



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones

PROYECTO FIN DE CARRERA

ESTIMACIÓN DE PRECIOS NOMINALES DE INTERCONEXIÓN PARA LA CMT

Autor: Sergio Hurtado Camarasa

Tutor: Ángel Navia Vázquez

Leganés, septiembre de 2010

A Olivia, mi mujer, mi amor. Sin ti no podría haberlo hecho. Contigo podré conseguir cualquier cosa.

RESUMEN

Este documento describe el procedimiento diseñado para la estimación de los precios nominales de interconexión de un operador móvil. El objetivo ha sido determinar aquellos precios que maximizan los ingresos que percibe el operador por el tráfico de terminación de voz que llega a su red en un determinado periodo de tiempo. Para ello ha sido necesario considerar aspectos técnicos y de negocio. Los precios deben ser seleccionados a priori, por lo que se requiere predecir el tráfico que el operador espera recibir. Además, es necesario optimizarlos, ya que están sujetos a las restricciones dictadas por la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones, al tratarse de un servicio regulado. Las tareas de predicción y optimización se han llevado a cabo por medio de técnicas de procesamiento digital.

En primer lugar se ha caracterizado en detalle el problema a resolver, tanto desde el punto de vista de negocio como del regulatorio. Para ello, se ha planteado un escenario válido por medio de un operador móvil ficticio, para el que se ha asignado una situación de negocio y se ha generado un histórico de datos aleatorios de tráfico siguiendo unos perfiles estándar. Después se han planteado diversos métodos de procesamiento digital de la información que

permiten abordar el problema. Tras esto se ha ilustrado cómo se han implementado las soluciones técnicas, siguiendo un procedimiento predefinido y se ha comprobado cómo efectivamente se consiguen maximizar los ingresos por el tráfico de terminación.

La facturación de los servicios de interconexión ha tenido un peso muy grande en las cuentas de resultados de los operadores móviles en los últimos años, por lo que la maximización de los ingresos por terminación de voz es una tarea sumamente importante.

Palabras clave: predicción, optimización, tarifas, trafico, interconexión, terminación, ingresos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xii
GLOSARIO	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO	2
1.2. FASES DE DESARROLLO	2
1.3. MEDIOS EMPLEADOS	2
1.4. ESQUEMA DE LA MEMORIA	3
2. DESCRIPCIÓN DEL NEGOCIO ENTRE OPERADORES DE TELECOMUNICACIONES EN ESPAÑA	5
2.1. COMUNICACIONES MÓVILES	8
2.1.1. Servicios de interconexión de tráfico	9
2.1.2. Servicios de Itinerancia	18
2.1.3. Operadores Móviles Virtuales	22
2.1.4. Regulación y evolución del mercado	25
2.2. COMUNICACIONES FIJAS	31
2.2.1. Servicios de interconexión de tráfico	32
2.2.2. Servicios de alquiler de circuitos a operadores	33
2.2.3. Servicios de transmisión de datos a operadores	34
2.2.4. Regulación y evolución del mercado	34
2.3. SERVICIOS DE INTERNET	35
2.3.1. Acceso mayorista a la línea telefónica	36
2.3.2. Acceso directo al bucle de abonado	36
2.3.3. Acceso indirecto al bucle de abonado	37
2.3.4. Regulación y evolución del mercado	37
2.4. SERVICIOS AUDIOVISUALES	38
2.4.1. Servicios de transporte de la señal audiovisual	38
2.4.2. Servicios de difusión de la señal audiovisual	39
3. TERMINACIÓN DE VOZ EN RED MÓVIL. CASO DE ESTUDIO	41
3.1. SERVICIO DE TERMINACIÓN DE VOZ	44
3.1.1. Escenarios de tráfico de terminación de voz	44

3.1.2.	Evolución del servicio de terminación voz en España	47
3.1.3.	Variables relevantes en el tráfico de terminación de voz.....	50
3.2.	MARCO REGULATORIO Y NORMATIVA ESPECÍFICA.....	55
3.2.1.	Declaración de dominancia de los operadores móviles. Contabilidad de costes.....	56
3.2.2.	Esquemas de tarificación del servicio de terminación	59
3.2.3.	Orientación a costes. Determinación del precio medio y ajuste de tarifas nominales.....	62
3.3.	CASO DE NEGOCIO.....	70
3.3.1.	Descripción general.....	72
3.3.2.	Análisis de impacto del procedimiento de maximización de ingresos de terminación	76
3.3.3.	Relación coste/beneficio	80
3.3.4.	Riesgos y posibles contingencias	80
3.3.5.	Conclusiones del estudio	81
4.	PLANTEAMIENTO TEÓRICO. MÉTODOS DE PREDICCIÓN Y OPTIMIZACIÓN	82
4.1.	TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN	84
4.1.1.	Búsqueda local	85
4.1.2.	Búsqueda global.....	86
4.2.	MÉTODOS DE PREDICCIÓN.....	92
4.2.1.	Regresión Lineal	93
4.2.2.	Perceptrón Monocapa	95
4.2.3.	Perceptrón multicapa	97
4.2.4.	Procesos Gaussianos	102
5.	IMPLEMENTACIÓN DE LAS SOLUCIONES	108
5.1.	MODELADO DE TRÁFICO DE TERMINACIÓN	110
5.1.1.	Generación del volumen de tráfico	110
5.1.2.	Determinación del número y duración de las llamadas	119
5.1.3.	Cuantificación de variables temporales independientes. Confección de muestras	125
5.2.	SISTEMAS DE PREDICCIÓN DE TRÁFICO DE TERMINACIÓN	128
5.2.1.	Regresión Lineal	129
5.2.2.	Perceptrón Multicapa	133
5.2.3.	Proceso Gaussiano	138
5.2.4.	Efecto de las variables temporales independientes en la reducción del error de predicción.....	142
5.3.	SISTEMA DE OPTIMIZACIÓN DE LAS TARIFAS NOMINALES DE TERMINACIÓN....	144
5.3.1.	Implementación del algoritmo evolutivo	145
5.3.2.	Pruebas de funcionamiento	147
5.3.3.	Valoración de resultados.....	151
6.	CONCLUSIONES Y NUEVAS LÍNEAS DE TRABAJO	153
7.	REFERENCIAS	156
7.1.	DOCUMENTOS OFICIALES Y RECOMENDACIONES	156
7.2.	PUBLICACIONES Y BIBLIOGRAFÍA.....	160
	ANEXO A PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO	162
	ANEXO B PRESUPUESTO DEL PROYECTO	164

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.....	10
Figura 2.2.....	11
Figura 2.3.....	12
Figura 2.4.....	20
Figura 2.5.....	21
Figura 2.6.....	27
Figura 2.7.....	28
Figura 2.8.....	29
Figura 3.1.....	48
Figura 3.2.....	49
Figura 3.3.....	50
Figura 3.4.....	53
Figura 3.5.....	64
Figura 3.6.....	71
Figura 3.7.....	74
Figura 3.8.....	75
Figura 3.9.....	77
Figura 3.10.....	79
Figura 4.1.....	94
Figura 4.2.....	95
Figura 4.3.....	97
Figura 4.4.....	98
Figura 4.5.....	99
Figura 4.6.....	102
Figura 5.1.....	111
Figura 5.2.....	114
Figura 5.3.....	116
Figura 5.4.....	117
Figura 5.5.....	118
Figura 5.6.....	119
Figura 5.7.....	121

Figura 5.8.....	122
Figura 5.9.....	123
Figura 5.10.....	124
Figura 5.11.....	124
Figura 5.12.....	130
Figura 5.13.....	132
Figura 5.14.....	136
Figura 5.15.....	137
Figura 5.16.....	140
Figura 5.17.....	141
Figura 5.18.....	144
Figura 5.19.....	149
Figura 5.20.....	152
Figura A.1.....	163

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.....	26
Tabla 2.2.....	27
Tabla 2.3.....	29
Tabla 5.1.....	113
Tabla 5.2.....	113
Tabla 5.3.....	127
Tabla 5.4.....	129
Tabla 5.5.....	131
Tabla 5.6.....	135
Tabla 5.7.....	136
Tabla 5.8.....	139
Tabla 5.9.....	140
Tabla 5.10.....	143
Tabla 5.11.....	148
Tabla 5.11.....	151

GLOSARIO

ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Loop</i>
AGI	<i>Acuerdo General de Interconexión</i>
APC	<i>Agrupación Para Consolidar</i>
APCC	<i>Agrupación Para Consolidar Comercial</i>
APCE	<i>Agrupación Para Consolidar Estructural</i>
AuC	<i>Authentication Centre</i>
BOE	<i>Boletín Oficial del estado</i>
CMT	<i>Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones</i>
EIR	<i>Equipment Information Register</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GSMA	<i>Global System for Mobile Communications Association</i>
HLR	<i>Home Location Register</i>
INE	<i>Instituto Nacional de Estadística</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
MAP	<i>Máximo A Posteriori</i>
MSC	<i>Mobile Switching Centre</i>
MVNO	<i>Mobile Virtual Network Operator</i>
NGA	<i>Next Generation Access</i>
OBA	<i>Oferta de Bucle de Abonado</i>
OIR	<i>Oferta de Interconexión de Referencia</i>
OMR	<i>Operador Móvil de Red</i>
OMV	<i>Operador Móvil Virtual</i>
ORLA	<i>Oferta de Referencia de Líneas Alquiladas Terminales</i>
PM	<i>Precio Medio</i>

PM _{MAX}	<i>Precio Medio Máximo</i>
PSM	<i>Peso Significativo en el Mercado</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
MMS	<i>Multimedia Messaging Service</i>
STB	<i>Servicio Telefónico Básico</i>
TDT	<i>Televisión Digital Terrestre</i>
TT	<i>Tarifa Típica</i>

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Entre los retos profesionales que se pueden presentar en la actualidad a un ingeniero de telecomunicaciones están aquellos en los que es necesario conjugar de habilidades técnicas junto con conocimientos de negocio. Este es el escenario que se plantea en este proyecto, en el que se emplean métodos de procesamiento digital de la información para resolver una situación de negocio entre operadores de telecomunicaciones. El problema en cuestión es la maximización de los ingresos percibidos por un operador móvil por la facturación a otros operadores de las llamadas de voz entrantes en su red. Este tipo de tráfico de interconexión, denominado tráfico de terminación de voz, se factura en base a unas tarifas que han podido ser seleccionadas por parte de los propios operadores en los últimos años, pero cumpliendo una serie de restricciones impuestas por la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones, CMT. La selección de estas tarifas ha sido una tarea extremadamente importante, debido al enorme peso de estos ingresos sobre las cuentas de resultados de los operadores.

1.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo principal de este proyecto es el diseño de un procedimiento fiable y eficiente para maximizar los ingresos asociados al tráfico de terminación de voz recibido por un operador móvil en un determinado periodo de tiempo. La maximización de estos ingresos requiere de dos tareas diferentes, ambas apoyadas en distintas técnicas de tratamiento digital de la información:

1. Predecir el tráfico de terminación que recibirá el operador en el periodo bajo estudio.
2. Obtener las tarifas óptimas sobre el tráfico esperado. Estas tarifas son aquellas que consigan los máximos ingresos respetando las limitaciones impuestas por la CMT.

Podemos entender cada una de estas tareas como objetivos parciales del proyecto.

1.2. FASES DE DESARROLLO

La planificación detallada del proyecto se describe al final de este documento, en el anexo A. Sin embargo, resulta conveniente plantear ahora los principales hitos que se han alcanzado en el desarrollo del proyecto. Los enumeramos a continuación:

1. Caracterización del problema. En esta primera fase se ha recopilado la información necesaria sobre los principales escenarios de negocio entre operadores de telecomunicaciones para describir y contextualizar el problema planteado. Además, se ha efectuado un análisis exhaustivo del servicio de terminación de voz.
2. Caso de negocio. Se ha planteado un escenario válido para la aplicación de las soluciones técnicas implementadas. Para ello, se ha creado un operador ficticio y se le ha asignado un escenario de negocio. Además, se ha generado para el operador un histórico de datos aleatorios de tráfico de terminación siguiendo unos perfiles estándar.

3. Estudio de las posibles soluciones técnicas. Se han analizado diferentes métodos de procesamiento digital de la información susceptibles de ser empleados para las tareas de predicción y de optimización requeridas.
4. Implementación de las soluciones. Se han aplicado las soluciones técnicas sobre el tráfico generado para el operador ficticio, y se ha comprobado que consiguen el objetivo planteado mediante las pertinentes pruebas de funcionamiento.

1.3. MEDIOS EMPLEADOS

Tanto la generación del tráfico del operador ficticio como la implementación de las técnicas de procesamiento digital empleadas se han llevado a cabo mediante la herramienta de cálculo matricial MATLAB V6.0, sobre un ordenador personal HP con procesador AMD Sempron[®] de 1990MHZ y memoria RAM de 1GB.

1.4. ESQUEMA DE LA MEMORIA

El grueso de esta memoria está formado por siete capítulos y dos anexos. El primer capítulo es esta introducción, mientras que los seis restantes y los dos anexos son los siguientes:

- **CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL NEGOCIO ENTRE OPERADORES DE TELECOMUNICACIONES EN ESPAÑA.** En este capítulo se explican los principales aspectos regulatorios y de negocio de los cuatro grandes mercados mayoristas identificados por la CMT que están establecidos entre los operadores de telecomunicaciones. Estos mercados son el de comunicaciones móviles, el de comunicaciones fijas, el de servicios de acceso a Internet y el de servicios audiovisuales.
- **CAPÍTULO 3. TERMINACIÓN DE VOZ EN RED MÓVIL. CASO DE ESTUDIO.** Este capítulo contiene el análisis pormenorizado del servicio de terminación de voz. Se describen en detalle sus aspectos regulatorios y de negocio. Se describen las características de variación temporal que posibilitan predecir el tráfico y se plantea un caso de negocio concreto para la aplicación del procedimiento de maximización de ingresos.

- **CAPÍTULO 4. PLANTEAMIENTO TEÓRICO. MÉTODOS DE PREDICCIÓN Y OPTIMIZACIÓN.** Se describe la base teórica de las técnicas de predicción y optimización que se han empleado en el desarrollo del proyecto. De cara a la optimización, se repasan las principales técnicas de búsqueda local y global, mientras que para la predicción, se describe la regresión lineal, los perceptrones monocapa y multicapa y los procesos gaussianos. El lector que ya domine estas técnicas puede obviar este capítulo y continuar en el capítulo 5.
- **CAPÍTULO 5. IMPLEMENTACIÓN DE LAS SOLUCIONES.** En este capítulo se expone cómo se han implementado las soluciones descritas en el capítulo 4 dentro del escenario de negocio planteado.
- **CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y NUEVAS LÍNEAS DE TRABAJO.** Se exponen las conclusiones particulares sobre los resultados obtenidos, así como algunas conclusiones generales derivadas del tipo de trabajo realizado. Además, se incluye una muestra de posibles aplicaciones adicionales que podrían acometerse a partir del trabajo realizado.
- **CAPÍTULO 7. REFERENCIAS.** Recoge las numerosas fuentes que se han consultado durante el desarrollo del proyecto. Se incluyen referencias sobre documentos oficiales, recomendaciones, publicaciones y bibliografía.
- **ANEXO A.** Contiene la planificación detallada del proyecto, indicando el tiempo empleado en cada tarea ejecutada.
- **ANEXO B.** Es el presupuesto del proyecto.

Al principio de cada capítulo se incluye un resumen de su contenido, en el que se destacan los resultados y conclusiones más relevantes.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN DEL NEGOCIO ENTRE OPERADORES DE TELECOMUNICACIONES EN ESPAÑA

En el sector de las telecomunicaciones está formado por dos mercados diferenciados, el primero y más conocido es el mercado minorista, a través del cual los operadores ofrecen sus productos y servicios al público general, ya sean particulares o empresas. El segundo, menos conocido pero también relevante es el mercado mayorista, por el cual los operadores de telecomunicaciones desarrollan y comercializan productos y servicios dirigidos a otros operadores de telecomunicaciones. Este mercado mayorista es el escenario en el que se ha desarrollado el trabajo que se presenta.

El mercado mayorista se puede desglosar en cuatro mercados específicos, atendiendo a las características de los productos y servicios que se explotan y comercializan entre operadores. Estos mercados son:

- Comunicaciones móviles

- Comunicaciones fijas
- Servicios de Internet
- Servicios audiovisuales

En los siguientes puntos describiremos los principales escenarios de negocio que se presentan en cada uno de estos mercados, dedicando más detalle al de comunicaciones móviles.

Contenido del capítulo

El capítulo esta formado por cuatro apartados, correspondientes a cada uno de los cuatro mercados mayoristas que acabamos de enunciar. En el primer apartado se describen los aspectos básicos de negocio de los servicios mayoristas de comunicaciones móviles más importantes. Estos servicios son:

- Servicios de interconexión. Permiten a los operadores intercambiar el tráfico originado en su red con destino la red de otro operador. Los desglosaremos en servicios de terminación, acceso, tránsito, tráfico internacional y mensajería Premium. Analizaremos tanto los flujos de tráfico como los flujos dinerarios que se producen en estos servicios.
- Servicios de itinerancia internacional o *Roaming*. Posibilitan la prestación de servicio telefónico móvil cuando el usuario se encuentra fuera de la zona de cobertura de su operador de red. Describiremos los flujos generados cuando un usuario de una red extranjera se conecta a una red española (Roaming IN), y cuando un usuario de una red española viaja fuera de España y se conecta a una red extranjera (Roaming OUT).
- Operadores Móviles Virtuales (OMV). Son empresas que ofrecen servicios de telefonía móvil sin disponer de toda la infraestructura necesaria para prestarlos. Distinguiremos entre operadores móviles virtuales completos y prestadores de servicio, matizando sus diferencias desde el punto de vista técnico y regulatorio.
- Regulación y evolución del mercado. Haremos un resumen del marco regulatorio y la evolución del mercado mayorista de comunicaciones móviles. Haremos especial hincapié en el servicio de terminación de voz,

para lo que presentaremos el mecanismo de bajadas progresivas de las tarifas nominales impuesto por la CMT.

El segundo apartado del capítulo describe el mercado mayorista de comunicaciones fijas. Lo describimos por medio de los siguientes apartados:

- Servicios de interconexión para operadores fijos. Son equivalentes a los servicios de interconexión para operadores móviles. Identificaremos las particularidades de negocio tanto de la interconexión por tiempo como de la interconexión por capacidad. Presentaremos la especificación que regula estos servicios (OIR, Oferta de Interconexión de Referencia).
- Servicios de alquiler de circuitos a operadores. Consisten en la puesta a disposición de otros operadores de una cierta capacidad de transmisión entre dos puntos, ya sea para enlazar con el cliente final o entre nodos de la red troncal del operador que contrata el servicio. Presentaremos la especificación que regula estos servicios (ORLA, Oferta de Referencia de Líneas Alquiladas Terminales).
- Servicios de transmisión de datos. Incluyen los servicios de líneas de datos de cualquier tipo de tecnología. Presentaremos la especificación que regula estos servicios (OBA, Oferta de Bucle de Abonado).
- Regulación y evolución del mercado. Veremos como la acción reguladora de la CMT está orientada a dinamizar el mercado mayorista de comunicaciones fijas.

El tercer apartado del capítulo está dedicado a los servicios de Internet, los cuales están muy ligados a los servicios de transmisión de datos. Los servicios que detallaremos son:

- Acceso mayorista a la línea telefónica. Como veremos, se trata del servicio mayorista de reventa, que consiste en la provisión por parte de un operador a otro del mismo servicio de banda ancha que ofrece a sus clientes finales.
- Acceso directo al bucle de abonado. Indicaremos las modalidades de desagregación del bucle, que se caracteriza porque un operador cede parte o todo el espectro del par de cobre a otros operadores.

- Acceso indirecto al bucle de abonado. Se trata de una modalidad de acceso a través de la tecnología xDSL que permite a un operador ofrecer un servicio de banda ancha utilizando los equipos de acceso de otro operador.
- Regulación y evolución del mercado. Resumiremos el marco regulatorio impulsado por la CMT.

El cuarto y último apartado de éste segundo capítulo presenta el mercado mayorista de servicios audiovisuales. Se introducen los servicios de transporte y difusión de la señal audiovisual. Al igual que en los tres puntos anteriores, el apartado se concluye con una presentación de la regulación vigente, destacando la evolución del Plan Nacional de Transición a la Televisión Digital.

2.1. COMUNICACIONES MOVILES

El mercado mayorista de redes móviles está configurado por una serie de servicios relacionados con la explotación de la infraestructura de estas redes, ya sea poniéndola a disposición de otros operadores con red propia o bien ofreciéndola a operadores sin red propia. La primera situación se dará siempre que exista tráfico móvil entre usuarios finales de distintas redes, mientras que la segunda situación se dará cuando un operador contrate servicios asociados a todas o parte de las infraestructuras del operador móvil de red para poder prestar servicios sus propios clientes. Tal como se puede intuir, ambos casos pueden producirse de forma simultánea.

En este punto cabe indicar que actualmente en España únicamente hay cuatro operadores móviles con infraestructura de red completa; estos son Telefónica Móviles España S.A.U. (MOVISTAR), Vodafone España S.A.U., France Telecom España (ORANGE) y Xfera Móviles S.A. (YOIGO). Los tres primeros tienen licencia de acceso radio para tecnologías 2G y 3G, mientras que YOIGO sólo dispone de licencia 3G. Como se verá en puntos sucesivos, existe una cantidad creciente de operadores móviles sin infraestructura de red completa, denominados operadores móviles virtuales (OMV). Los principales servicios mayoristas de comunicaciones móviles son:

- Servicios de interconexión, que consisten en el conjunto de tráficos originados desde una red distinta de la red de destino. A estos tipos de tráfico se les denomina off-net, en contraposición al tráfico on-net, originado en una red y terminado en ella misma.
- Servicio de itinerancia internacional o Roaming, que permite que usuarios finales se conecten a una red móvil aunque se encuentren fuera del radio de cobertura de la red nacional de su operador.
- Servicios de gestión de sistemas y tráfico generado por operadores móviles virtuales (OMV) en la red de su operador anfitrión.

2.1.1. Servicios de interconexión de tráfico

Dependiendo de los escenarios de tráfico y del operador que facture en cada caso, encontramos diferentes tipos de servicio de interconexión.

Los servicios más relevantes son los siguientes:

- Terminación
- Acceso
- Tránsito
- Tráfico internacional
- Servicios Premium de mensajería

A continuación describiremos cada uno de estos servicios, indicando en cada caso los dos flujos que se producen entre los operadores. En primer lugar tenemos el flujo de tráfico, y en segundo lugar tenemos el flujo dinerario. Este segundo flujo representa la entrada y salida de dinero para cada operador. De esta forma, el destinatario del flujo dinerario será el operador que recibe el ingreso, y por lo tanto, el que factura al otro operador, mientras que el originario del flujo dinerario incurrirá en un coste, y será facturado por el otro operador.

Actualmente existen en España dos modalidades de interconexión: la interconexión por tiempo e interconexión por capacidad. En la primera, los servicios de interconexión se facturan en función del tráfico cursado en minutos. En la segunda, se factura únicamente por enlace contratado, independientemente del volumen de minutos cursados a través de este enlace,

aunque cabe indicar que la interconexión por capacidad es prácticamente de uso exclusivo en redes fijas.

El principal requisito para poder intercambiar tráfico y establecer los diferentes flujos dinerarios es la firma del correspondiente Acuerdo General de Interconexión (AGI). Este acuerdo comercial determina qué servicios podrán interconectarse (voz, datos, servicio de mensajes cortos SMS, servicio de mensajes multimedia MMS, videollamada, etc.), bajo qué condiciones técnicas (acuerdos de nivel de servicio) y en qué condiciones económicas. En el caso del servicio de terminación de voz en red móvil, los precios están regulados, de forma que el operador móvil establece un precio único para todas las llamadas terminadas en su red, pero bajo unas condiciones y las restricciones que son marcadas por la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones (CMT). En el capítulo 3 ahondaremos más en este tema, ya que la optimización de estos precios es uno de los puntos fundamentales de este trabajo.

Describimos ya los servicios de interconexión más relevantes:

- Terminación. Este servicio de interconexión se produce cuando se genera un evento de tráfico móvil (llamada de voz, datos, SMS, MMS, etc.) entre usuarios finales de dos operadores de red distintos (fijos o móviles), siendo el operador que recibe el evento el que factura por ello al operador que lo origina. Por lo tanto, el operador que recibe el evento obtiene un ingreso por facilitar la entrada en su red. Obviamente, el operador que origina el evento incurre en un coste equivalente al ingreso del otro operador. Este servicio se ilustra en la siguiente figura:

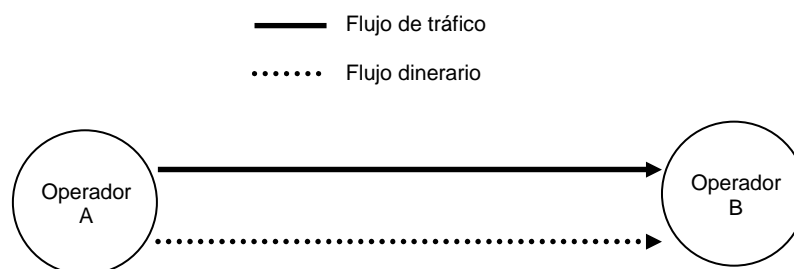


Figura 2.1 Servicio de terminación

- Acceso. Este servicio de interconexión se produce cuando se genera un evento de tráfico móvil (llamada de voz, datos, SMS, MMS, etc.) entre dos operadores de red distintos (fijo o móvil), siendo el mismo operador el que origina el evento y el que factura por ello. Esto implica que el operador que recibe el evento incurre en un coste derivado de la entrada en su red. Esta inversión del flujo dinerario se produce cuando un usuario final llama a numeración gratuita de otro operador, y se fundamenta en que los costes de explotación de la red que origina el evento se trasladan al operador que lo recibe en lugar de al cliente final, ya que es decisión del operador receptor proporcionar un servicio gratuito a un cliente final de otro operador. Ejemplos de este tipo de servicio son todas las numeraciones que empiezan por los prefijos 900/800 y las numeraciones de atención al cliente que empiezan por 1 (por ejemplo, la numeración 1004 de Telefónica de España, que entre otros, tiene fines comerciales). Este servicio se ilustra en la siguiente figura:

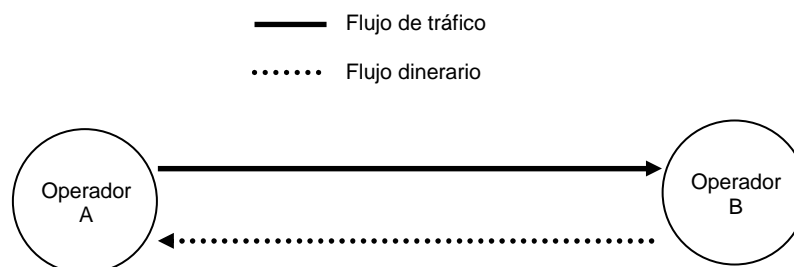


Figura 2.2 Servicio de acceso

- Tránsito. Este servicio de interconexión se produce cuando se genera un evento de tráfico móvil (llamada de voz, SMS, MMS, etc.) entre usuarios finales de dos operadores de red distintos (fijos o móviles), siendo un tercer operador el que encamina el evento entre ambas redes. Esta situación puede producirse cuando el operador origen del evento y el operador destinatario del mismo no tienen formalizado el pertinente acuerdo de interconexión. En este caso, se pueden producir diferentes escenarios desde el punto de vista de negocio. El más común es que se trasladen los costes de terminación aplicando

un margen comercial (el operador A paga a B una cantidad mayor que la que paga el operador B al operador C). Este caso se ilustra en la siguiente figura:

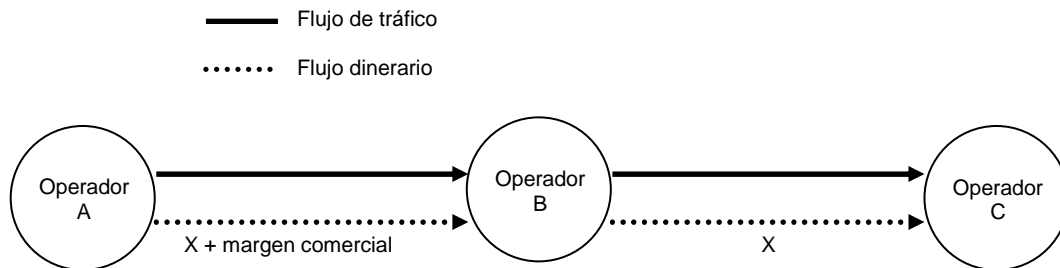


Figura 2.3 Servicio de tránsito

Hay que señalar que los servicios de tránsito se cursan en su totalidad mediante la interconexión por tiempo, con la excepción de la componente de acceso de los servicios de red inteligente, que sí puede ser cursada por capacidad. No obstante, el peso de esta componente sobre el total de ingresos y de tráfico de interconexión es muy reducido, tal como veremos cuando analicemos con más detalle el acceso y terminación de numeración especial y de red inteligente en redes fijas.

- Tráfico internacional. Dentro de los servicios de interconexión también se suele incluir el tráfico de terminación internacional, formado por llamadas, datos o mensajes terminados en una red móvil del territorio nacional y con origen en una red de fuera del Estado español.

De forma complementaria se tiene el tráfico internacional saliente, en que el operador móvil nacional origina eventos de tráfico con redes de destino extranjeras.

La facturación de los servicios internacionales depende del tipo de tráfico que se curse. Actualmente en España sólo está regulado el flujo dinerario para el tráfico de terminación nacional de voz con origen internacional. De esta forma, para llamadas internacionales entrantes a redes móviles españolas se aplica el precio de

terminación genérico para voz, y no hay diferencia desde el punto de vista económico entre recibir tráfico originado en una red española o extranjera. El principal requisito para recibir tráfico internacional es la firma del correspondiente Acuerdo de Interconexión con el operador que entrega el tráfico al operador móvil de red.

Los operadores que entregan tráfico internacional se denominan *carriers* (portadores). Estos *carriers* en general no serán los propietarios de la red originaria del evento, sino que en la mayoría de los casos realizan funciones de operador de tránsito entre dos redes. Existen determinados operadores nacionales que hacen funciones de carrier (Telefónica de España y ONO entre otros), tanto por tener la infraestructura de red necesaria como por el hecho de que es un nicho de mercado adicional. Para un operador internacional resulta sencillo firmar acuerdos comerciales con un número reducido de operadores en un mismo país, en lugar de tener que firmar acuerdos de interconexión específicos con todos los operadores, lo cual resulta operativamente inviable. Así, manteniendo el esquema de traslación de costes, el operador internacional paga al carrier español lo estipulado en su acuerdo bilateral, y este a su vez paga el precio de terminación de voz al operador español destinatario del evento de tráfico.

Dentro de este contexto aparecen los denominados *brokers* de tráfico, que como sus homónimos bursátiles, se dedican a la compra-venta dinámica, pero en este caso de destinos internacionales, cuyos precios varían en función de la oferta y la demanda. Tanto los operadores móviles de red nacionales como los carriers pueden recurrir a este tipo de empresas. Así, se facilita la posibilidad de alcanzar determinados destinos internacionales, cosa que de otra forma sería inviable desde el punto de vista técnico y/o económico. La existencia de los brokers hace que el número de redes de tránsito entre dos destinos internacionales sea a priori indeterminado. Como cada nueva red de tránsito implica por necesidad una caída en el nivel de servicio, los operadores de red suelen contratar diferentes

destinos con diferente calidad de servicio, en función de la demanda de sus propios clientes y de la política de empresa en cuanto a calidad de servicio. Así, aparecen los denominados servicios Premium internacionales, caracterizados por una alta calidad de servicio, ya que el número de redes de tránsito es el menor posible. Evidentemente, cuanto mayor sea la calidad de servicio, mayor será el coste para el operador móvil o el carrier.

Una alternativa al uso de carriers, es la firma de acuerdos bilaterales de interconexión a nivel internacional. Este tipo de acuerdo comercial surge cuando dos operadores de diferentes países consideran que por volumen de tráfico intercambiado entre ambas redes, por coste y por calidad de servicio, es interesante formalizar un acuerdo bilateral. Este tipo de acuerdos se realiza bajo los modelos que proporciona la GSMA (Global System for Mobile Communications Association). Esta asociación internacional engloba a más de 750 operadores de más de 200 países en todo el mundo. Además, reúne sobre un mismo escenario a operadores de telecomunicaciones, fabricantes de terminales, empresas de desarrollo software, proveedores de equipamiento de red y sistemas, proveedores de servicios de Internet y empresas del sector audiovisual y medios de comunicación, con el objetivo de crear estándares técnicos y modelos del negocio entre operadores y empresas del sector. En el contexto de la interconexión entre operadores móviles, la GSMA ha creado diferentes modelos de acuerdo comercial en función del tipo de servicio interconectado. El modelo de acuerdo comercial para el servicio de interconexión de voz es el AA60, de forma que si dos operadores de diferentes países desean formalizar un acuerdo bilateral para la interconexión del servicio de voz, deberán rubricar el citado modelo.

Es necesario remarcar que la firma de acuerdos bilaterales entre operadores de diferentes países no debe vulnerar en ningún caso la regulación específica de cada país, de forma que en un acuerdo bilateral internacional, el operador móvil español no puede ofrecer

precios de interconexión menores que los regulados para operadores nacionales. De esta forma se evita que el tráfico nacional se derive a redes extranjeras, con la pérdida de ingresos para el resto de operadores nacionales y calidad de servicio que ello supondría.

En el caso de los mensajes de texto SMS y mensajes multimedia MMS, el tráfico internacional se denomina respectivamente SMS interworking y MMS interworking. Para la facturación en estos casos, aplican los acuerdos particulares que cada operador móvil español pueda tener con sus equivalentes extranjeros. De nuevo la GSMA facilita la rúbrica de acuerdos bilaterales por medio de los modelos de acuerdo AA19 para interconexión de SMS y AA70 para MMS. Los servicios más modernos como la videollamada o la mensajería instantánea se incorporan como addenda al correspondiente acuerdo de interconexión internacional, el citado AA60.

En este punto cabe destacar una circunstancia particular que se produce con los SMS internacionales. Para el resto de servicios, es imprescindible la firma de un acuerdo o addendum específico para poder establecer la correspondiente interconexión, y por lo tanto garantizar el servicio entre redes internacionales. Sin embargo, con los SMS no es así, porque la infraestructura técnica se establece durante las pruebas técnicas para el servicio de itinerancia internacional o Roaming. De esta manera, se puede disfrutar de interconexión de SMS con un operador internacional sin que haya acuerdo comercial al respecto, ya que el acuerdo de Roaming y el de SMS interworking son independientes.

En estas circunstancias, los operadores suelen realizar un análisis del tráfico intercambiado con el operador internacional correspondiente, con el que no se tiene acuerdo de intercambio de SMS, pero sí se dispone del servicio entre ambas redes. Lo que se hace es analizar el balanceo de tráfico: si el número de mensajes entrantes es muy superior al número de mensajes salientes, o simplemente superior pero con un volumen elevado de intercambio de mensajes en un determinado intervalo de tiempo, se plantea la

firma del correspondiente acuerdo AA19 al operador internacional. De esta forma, se intenta establecer un flujo dinerario para el SMS interworking sólo en los casos en que resulte interesante. Si el operador internacional no accede a la firma del acuerdo, la práctica habitual es la cancelación de la recepción de SMS provenientes de ese operador. De esta forma ese operador internacional dejará de percibir ingresos de cliente final por el envío de SMS al operador que ha cancelado la recepción de los mismos. Evidentemente, esta posible pérdida de ingresos hace que muchos de los operadores internacionales con los que se tiene tráfico no balanceado, acaben firmando el correspondiente acuerdo AA19.

- Servicios Premium de mensajería. Estos servicios de tarificación adicional, denominados SMS y MMS Premium, los ofertan determinadas compañías para que los abonados de telefonía móvil soliciten acceso a contenidos, suscripciones, servicios para adultos y participen en concursos, campañas benéficas, etc. Se denominan servicios de tarificación adicional porque el precio al usuario final es en general superior al precio de los servicios SMS y MMS ordinarios. Los ingresos fruto de la explotación de estos servicios se reparten en porcentaje variable entre el operador de red que presta servicio al cliente final y los proveedores de contenidos.

Hasta el pasado mes de enero de 2008, la numeración de los SMS y MMS Premium no estaba sometida a ningún control (precios e información al usuario, numeración, etc.). Los mismos operadores abrían sus propios rangos de numeración interna, que después alquilaban a las compañías que pretendían ofrecer servicios de tarificación adicional a través de SMS/MMS. Con la Orden del Ministerio de Industria del pasado mes de enero, se dictaron una serie de instrucciones, que otorgan a la CMT la gestión de dichos rangos, mejoran la utilización de estos recursos y determinan los precios máximos que pueden cobrar las compañías acorde con su número asignado.

Los rangos de numeración y la descripción de los servicios asociados se indican a continuación:

Rango 25YAB, 27YAB. Numeración atribuida para la prestación de servicios SMS/MMS Premium con precio neto por servicio completado menor o igual a 1,2 euros.

Rango 280AB. Numeración atribuida para campañas de tipo benéfico o solidario, con precio neto por servicio completado menor o igual a 1,2 euros.

Rango 29YABM. Reservado para futuras expansiones a 6 cifras de la numeración para la prestación de servicios SMS/MMS Premium con precio neto por servicio completado menor o igual a 1,2 euros.

Rango 35YAB, 37YABM. Numeración atribuida para la prestación de servicios SMS/MMS Premium con precio neto por servicio completado superior a 1,2 euros e inferior o igual a 6 euros.

Rango 39YABM. Reservado para futuras expansiones a 6 cifras de la numeración para la prestación de servicios SMS/MMS Premium con precio neto por servicio completado superior a 1,2 euros e inferior o igual a 6 euros.

Rango 795ABM, 797ABM. Numeración atribuida para la prestación de servicios SMS/MMS Premium de suscripción con precio neto por mensaje recibido inferior o igual a 1,2 euros.

Rango 799ABMC. Reservado para futuras expansiones a 7 cifras de la numeración para la prestación de servicios SMS/MMS Premium de suscripción con precio neto por mensaje recibido inferior o igual a 1,2 euros.

Rango 995ABM, 997ABM. Numeración atribuida para la prestación de servicios SMS/MMS Premium exclusivos para adultos con precio neto por servicio completado inferior o igual a 6 euros.

Rango 999ABMC. Reservado para futuras expansiones a 7 cifras de la numeración para la prestación de servicios SMS/MMS Premium exclusivos para adultos con precio por servicio completado inferior o igual a 6 euros.

2.1.2. Servicios de Itinerancia

El servicio de itinerancia o Roaming se define como la capacidad de un usuario de telefonía móvil para realizar y recibir llamadas, datos o cualquier otro evento de tráfico cuando se encuentra fuera de la zona de cobertura de su operador de red, por medio de la conexión automática a otra red móvil, denominada comúnmente como *red visitada*.

El establecimiento técnico de los servicios de itinerancia entre dos operadores móviles se posibilita por medio de acuerdos comerciales bilaterales. Si la red visitada se encuentra en el mismo país que la red del usuario final, el servicio se denomina Roaming nacional. En España, este tipo de acuerdo se ha establecido entre operadores móviles para garantizar el servicio universal, sobre todo en áreas rurales y por motivos técnicos y regulatorios. Por ejemplo, Xfera Móviles S.A. (YOIGO) llegó a un acuerdo de Roaming nacional con Vodafone España S.A.U. para garantizar el servicio a sus clientes fuera de las áreas de cobertura 3G, ya que sólo dispone de licencia de espectro radioeléctrico para esa tecnología.

Si la red visitada se encuentra fuera del país de origen de la red del usuario final, el servicio de itinerancia se denomina Roaming internacional o Roaming global. Si la red visitada opera bajo diferente estándar técnico que la red de origen, se suele hablar de Roaming inter-estándar.

El hecho de que el servicio de Roaming sea posible en más de 200 países en todo el mundo, es una de las claves del éxito de la tecnología GSM y sus diferentes evoluciones. De nuevo, esto ha sido y es posible gracias al trabajo desarrollado por la GSMA, que ha facilitado la rúbrica de acuerdos bilaterales de Roaming internacional por medio de los modelos AA14. De esta manera, un usuario de telefonía móvil puede utilizar el servicio en casi cualquier parte del mundo, teniendo un único número de teléfono y una única factura.

Desde el punto de vista del negocio entre operadores en España, se distinguen dos tipos de situaciones de Roaming. La primera se denomina Roaming IN, que se produce cuando un usuario de una red extranjera se conecta a una red española, y el Roaming OUT, que se produce cuando un

usuario de una red española viaja fuera de España y se conecta a una red extranjera. Como se puede suponer, ambas situaciones en realidad son la misma, sin más que intercambiar los papeles entre la red visitada y la red origen del usuario.

- Escenarios de tráfico y flujos dinerarios. Los escenarios de tráfico que un usuario de una red móvil extranjera puede generar cuando se conecta a una red móvil española son exactamente los mismos que se generan para un usuario de esa red visitada. Esto significa que tanto los escenarios de terminación, acceso, tránsito, servicios de valor añadido y sobre todo, llamadas internacionales son exactamente los mismos que hemos visto con anterioridad (aunque es posible que haya restricciones en los servicios de valor añadido, por motivos de control de fraude). Sin embargo, se producen nuevos flujos dinerarios, fruto de la relación comercial entre la red origen y la red visitada. Cuando un usuario en situación de Roaming realiza una llamada, SMS, MMS, conexión de datos, etc., el operador de la red origen del usuario incurre en un coste por uso de red que se paga al operador de la red visitada. Esto implica que el operador de la red visitada factura a la red de origen. Cabe indicar que en situaciones de Roaming no se considera la facturación por capacidad, pero sí es habitual la aplicación de descuentos por volumen de tráfico, es decir, la red visitada puede aplicar descuentos en la facturación a la red origen en función de la cantidad de minutos entregada en un intervalo de tiempo determinado. Estos descuentos surgen por la competencia entre los operadores de red de cada país visitado por hacerse con los *Roamers* (usuarios de Roaming) de la misma red de origen. Esto es así porque los operadores pueden tener acuerdos bilaterales con varios operadores de un mismo país, y cada red origen puede configurar para sus usuarios una red predeterminada en cada país visitado.

En la siguiente figura mostramos el flujo dinerario que se produce ante cualquier escenario de tráfico saliente de la red visitada:

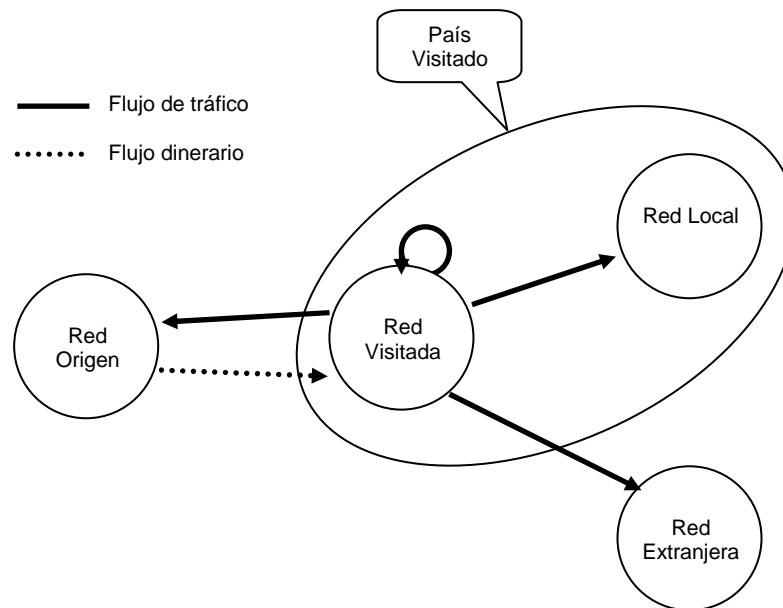


Figura 2.4 Flujos en Roaming para tráfico saliente

En esta figura tenemos cuatro redes: la red origen, a la cual está suscrito el usuario final; la red visitada, a la cual está conectado el usuario final; una red local, que se encuentra en el mismo país que la red visitada, y una red extranjera, que no se encuentra ni en el país de la red origen ni en el país visitado. La red origen deberá pagar a la red visitada por cualquier evento de tráfico iniciado por el usuario final, independientemente de las relaciones comerciales de la red visitada. Para el tráfico generado hacia redes del país visitado, sólo se factura por el tráfico de terminación, incluyéndose dentro de este tipo de tráfico cualquier llamada en tránsito nacional.

Para las llamadas internacionales efectuadas en Roaming, la red visitada suele dividir el total de destinos internacionales en zonas, de forma que el precio ofrecido a la red origen es el mismo para un conjunto de países.

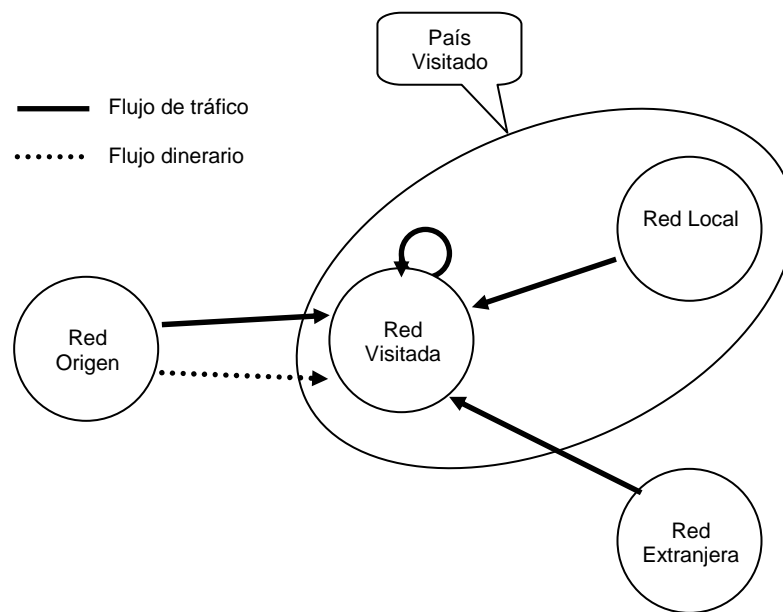


Figura 2.5 Flujos en Roaming para tráfico entrante

Hasta este momento sólo hemos hecho referencia a la facturación de eventos de tráfico iniciados en Roaming por el usuario final. Sin embargo, los operadores de la red visitada también facturan a la red origen por determinados eventos de tráfico recibidos por el usuario final en Roaming. De hecho, los únicos eventos de tráfico recibido por los que no se factura son los mensajes SMS y MMS, si bien en éste último caso sí se facturaría por la conexión de datos asociada a la descarga del contenido. Hechas estas salvedades, los flujos asociados a eventos de tráfico recibidos se muestran en la figura 2.5.

Por último cabe comentar que debido a la gran cantidad de operadores internacionales existente, la firma y mantenimiento de acuerdos bilaterales puede resultar algo extremadamente complejo para un operador móvil de red. Esta situación ha propiciado la aparición de los denominados *Roaming hubs*. Los Roaming hubs son empresas que se dedican a la mediación entre operadores móviles de red de diferentes países, con el objetivo de garantizar el servicio de Roaming a los clientes finales de cada operador, sin necesidad de firmar acuerdos bilaterales. En general, estos *Roaming hubs* están auspiciados por grandes operadores internacionales, favoreciéndose del tejido comercial ya establecido por la empresa matriz para

generar un nuevo negocio. Por razones similares, también han aparecido las denominadas *Clearing Houses*, empresas encargadas de facilitar la facturación y conciliación de los servicios de Roaming, tareas que podrían resultar inabordables por el elevado número de operadores de distintas nacionalidades con los que un operador de red puede tener acuerdo bilateral de Roaming. En algunos casos, los operadores pueden incluso delegar en empresas de este tipo la propia negociación de los acuerdos bilaterales.

2.1.3. Operadores Móviles Virtuales

Un operador móvil virtual (OMV) es una empresa que ofrece servicios de telefonía móvil sin disponer de la totalidad de la infraestructura técnica y de red necesaria para prestar dichos servicios. Por lo tanto, necesitan acuerdos comerciales con otras empresas del sector, en particular con operadores móviles de red (OMR), para poder ofrecer y garantizar el servicio a sus clientes. Tal como ya hemos indicado, en España sólo hay cuatro operadores móviles de red: MOVISTAR, VODAFONE, ORANGE y YOIGO, las tres primeras con licencia de acceso radio para 2G y 3G, y YOIGO sólo con licencia 3G.

Los operadores móviles virtuales se pueden catalogar en dos tipos fundamentales en función de la infraestructura de red de la que dispongan:

- Operadores móviles virtuales completos (o *Full MVNO*, del inglés *Full Mobile Virtual Network Operator*)
- Operadores móviles virtuales prestadores de servicio

Aparte de la propia infraestructura de red, como se verá a continuación, estos modelos tienen obligaciones regulatorias diferentes.

- Operadores móviles virtuales completos. Estos operadores se caracterizan por carecer de licencia de acceso radio para la prestación de servicios de comunicaciones móviles. Por tanto, no disponen de estaciones base, y en general de cualquier estructura de red de acceso radio de GSM. Sin embargo, si disponen de parte o toda la infraestructura de red troncal, pudiendo incluir conmutadores de red móvil (MSC, Mobile Switching Center), registros de abonados

(HLR, Home Location Register), o incluso nodos de soporte, como el nodo de autenticación (AuC, Authentication Center) o el nodo de identificación de terminales (EIR, Equipment Information Register).

Al carecer de red de acceso radio, los OMV completos tienen que llegar a un acuerdo con alguno de los operadores de red con licencia. Estos acuerdos serán específicos para cada relación entre el OMV completo y su operador de red implicado (también denominado operador *host*). Esto es debido a que cada OMV completo tendrá unas necesidades diferentes en cuanto a la arquitectura de red móvil y el propio encaminamiento dentro de la red del operador *host*.

Por otra parte, es evidente que todo OMV completo debe disponer de la infraestructura de red necesaria para poder establecer puntos de interconexión específicos con los diferentes operadores nacionales o internacionales, de forma que sea posible la formalización del Acuerdo General de Interconexión (AGI) con los operadores nacionales, o acuerdos bilaterales con operadores internacionales. De esta manera, los OMV completos están sujetos a la regulación específica de interconexión, de manea similar a como lo están los operadores móviles de red. Esto es especialmente relevante, ya que como se verá posteriormente, los precios de interconexión suponen una parte muy importante de los ingresos de los operadores móviles.

Las nuevas compañías que ofrecen servicios como OMV completo en España provienen de diferentes mercados; podemos destacar a E-Plus Móviles S.L. (SIMYO), empresa multinacional cuya matriz es la holandesa KPN, a Cableuropa S.A.U. (ONO), proveniente del mercado nacional de telefonía fija, y también provenientes del mercado de la telefonía fija, pero de ámbito local cabe destacar a Telecable de Asturias S.A.U., R Cable y Telecomunicaciones Galicia S.A. y Euskaltel S.A., si bien el caso de esta última es ligeramente diferente, ya que hasta principios del año 2007, Euskaltel fue la marca de la desaparecida AMENA (ahora ORANGE) en el País Vasco; de hecho, muchos consideran a Euskaltel como el primer OMV prestador de servicio que hubo en España, antes incluso de la

aprobación de la orden CTE/601/2002 [1], publicada por el entonces Ministerio de Ciencia y Tecnología, y que daba el primer impulso a la creación del mercado de operadores móviles virtuales.

- Operadores móviles virtuales prestadores de servicio. Estos operadores se caracterizan por no disponer de infraestructura de red móvil propia, de forma que contratan todos los servicios de red a su operador host. Sin embargo, sí pueden disponer de infraestructura de sistemas para la facturación, el aprovisionamiento e incluso su propia herramienta de CRM (Customer Relationship Management) para la gestión administrativa de sus clientes. Cuanta más infraestructura de sistemas posea el prestador de servicio, mayor independencia y flexibilidad tendrá, lo cual es muy importante en un mercado cada vez más competitivo. Por ejemplo, si un prestador de servicio no dispone de su propio sistema de facturación, necesitará la actuación de su operador host o proveedor para modificar cualquier tarifa de cliente final o aplicar cualquier tipo de promoción comercial. En este contexto surgen los denominados Enablers, que son empresas que actúan de proveedor de infraestructuras, servicios y soporte a los OMV, y que les permite trabajar con un modelo de externalización de servicios. Así, los sistemas de información, la integración con el operador de red u otros elementos necesarios para proveer el servicio a sus clientes finales son gestionados por el Enabler, con mucha más agilidad y eficiencia que si del propio operador de red se tratase, y con una inversión mucho menor.

Por otra parte, la independencia de la infraestructura de sistemas también permite que los acuerdos comerciales entre los operadores de red y los prestadores de servicio sean mucho más flexibles, de forma que sea posible excluir determinados tipos de tráfico, como puede ser el caso del tráfico internacional o los servicios de tarificación adicional. De esta manera, el prestador de servicio podría, por ejemplo, contratar los servicios de tráfico internacional a un operador de red distinto y más económico; en una situación como ésta, el operador host le entregaría el tráfico a un tercero, pudiendo

reducir costes y por tanto las tarifas a cliente final para el tráfico internacional.

Dentro de los prestadores de servicio existe una tipología de “marca blanca”, en la que el prestador de servicio únicamente aporta la marca comercial, mientras que el operador host se encarga de todo lo demás. Actualmente en España, es SIMYO, un OMV completo, el que está a la cabeza de este tipo de acuerdos comerciales, incorporando bajo su infraestructura a marcas tales como BANKINTER MÓVIL, XL MÓVIL o BLAU entre otras, y contando con la red de acceso de ORANGE.

En la actualidad, la estrategia comercial de la mayoría de los prestadores de servicio en España se basa en la reducción de las tarifas a cliente final, a costa de reducir el margen comercial y la inversión; en definitiva, es el concepto *Low Cost* aplicado a las comunicaciones móviles. Además, los prestadores de servicio se suelen centrar en determinados nichos de mercado, como son los casos de LEBARA LIMITED UK o HAPPY MÓVIL (grupo The Phone House), operadores especializados en inmigrantes, ya que ofrecen tarifas bajas para tráfico internacional. Otras compañías pretenden aprovechar su extensa red de distribución para ofrecer un producto con su imagen de marca (CARREFOUR, EROSKI o DIAMÓVIL). También se dan otras situaciones, como por ejemplo MÁSmovil, que es un operador independiente que centra su estrategia comercial en ofrecer tarifas muy bajas con un buen nivel de atención al cliente, y cuyo nicho de mercado trata de ser los jóvenes, cosa que queda de manifiesto en sus agresivas campañas publicitarias.

2.1.4. Regulación y evolución del mercado

Uno de los aspectos regulatorios más importantes dentro del mercado mayorista de comunicaciones móviles es el referente a la determinación de las tarifas nominales de terminación de voz; además, se trata del eje principal del presente proyecto.

La acción regulatoria comenzó con la declaración de dominancia de los operadores móviles en el mercado de interconexión, pasando a ser llamados operadores con poder significativo en el mercado (PSM). El primer operador en ser declarado como dominante en el mercado de interconexión fue MOVISTAR en julio del 2000 [2], mientras que VODAFONE (AIRTEL) lo fue en octubre de 2001 [3] y ORANGE (AMENA) en septiembre de 2003 [4]. Tal como se explicará en el capítulo 3, los operadores dominantes tienen la obligación de mantener sus tarifas nominales de terminación orientadas a los costes de prestación del servicio, lo cual ha provocado que la CMT proponga bajadas de estas tarifas en repetidas ocasiones. El principal objetivo de esta regulación es salvaguardar los intereses de los usuarios finales y de los operadores en un entorno de competencia entre estos últimos, de forma que no se entorpezca la entrada de nuevos agentes en el mercado. En septiembre de 2006 se produjo un hito especialmente importante en lo referente a la regulación de estas tarifas. La CMT aprobó el mecanismo por el que se regulaban los precios de terminación de MOVISTAR, VODAFONE y ORANGE, por su condición de operadores con poder significativo en el mercado en el negocio de terminación de llamadas de voz en redes móviles [5]. Con este objeto, la CMT estableció un primer mecanismo de reducción progresiva (primer *glide-path*) para el periodo comprendido entre octubre de 2006 y octubre de 2009, que imponía bajadas en las tarifas de terminación cada semestre (en abril y octubre) hasta alcanzar un mismo precio medio de terminación (0,07 €/minuto).

La evolución de los precios medios se muestra en la siguiente tabla (en €/minuto) y en forma de gráfica.

	16 oct 06 – 15 abr 07	16 abr 07 – 15 oct 07	16 oct 07 – 15 abr 08	16 abr 08 – 15 oct 08	16 oct 08 – 15abr 09	15 abr 09 – 15 oct 09
MOVISTAR	0,1114	0,1031	0,0948	0,0866	0,0783	0,0700
VODAFONE	0,1135	0,1048	0,0961	0,0874	0,0787	0,0700
ORANGE	0,1213	0,1110	0,1008	0,0905	0,0803	0,0700

Tabla 2.1 Primer *Glide-path*: evolución de los precios medios máximos de terminación (€/minuto)

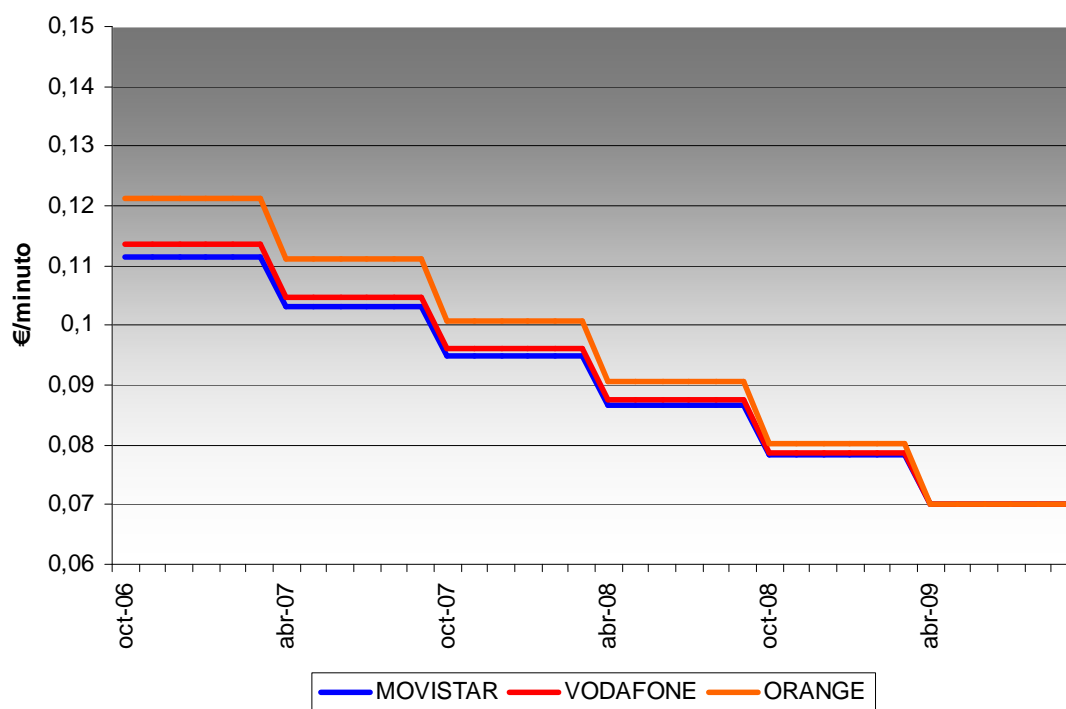


Figura 2.6 Primer *Glide-path*: evolución de los precios medios máximos de terminación (€/minuto)

Adicionalmente, en 2007 se designó a YOIGO como operador con PSM [6]. En consecuencia, la CMT elaboró para YOIGO un plan de precios individualizado que el operador debía respetar. Concretamente, el precio de terminación que la CMT impuso a YOIGO fue una media ponderada de los precios de terminación del resto de operadores con PSM, más un margen que al final del periodo será del 48,82%. La evolución del diferencial de precios medios de los operadores PSM se ilustra a continuación, en donde se toma como referencia el precio medio asignado a MOVISTAR, ya que es el que ha disfrutado de menores precios al ser el primer operador PSM, y tener por tanto menos costes al haber desarrollado economías de escala con anterioridad.

	16 oct 06 – 15 abr 07	16 abr 07 – 15 oct 07	16 oct 07 – 15 abr 08	16 abr 08 – 15 oct 08	16 oct 08 – 15abr 09	15 abr 09 – 15 oct 09
MOVISTAR	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
VODAFONE	1,89%	1,65%	1,37%	0,92%	0,51%	0,00%
ORANGE	8,89%	7,66%	6,33%	4,50%	2,55%	0,00%
YOIGO			51,53%	50,72%	49,89%	48,82%

Tabla 2.2 Evolución del diferencial de precio medio por operador PSM durante el primer *glide-path*

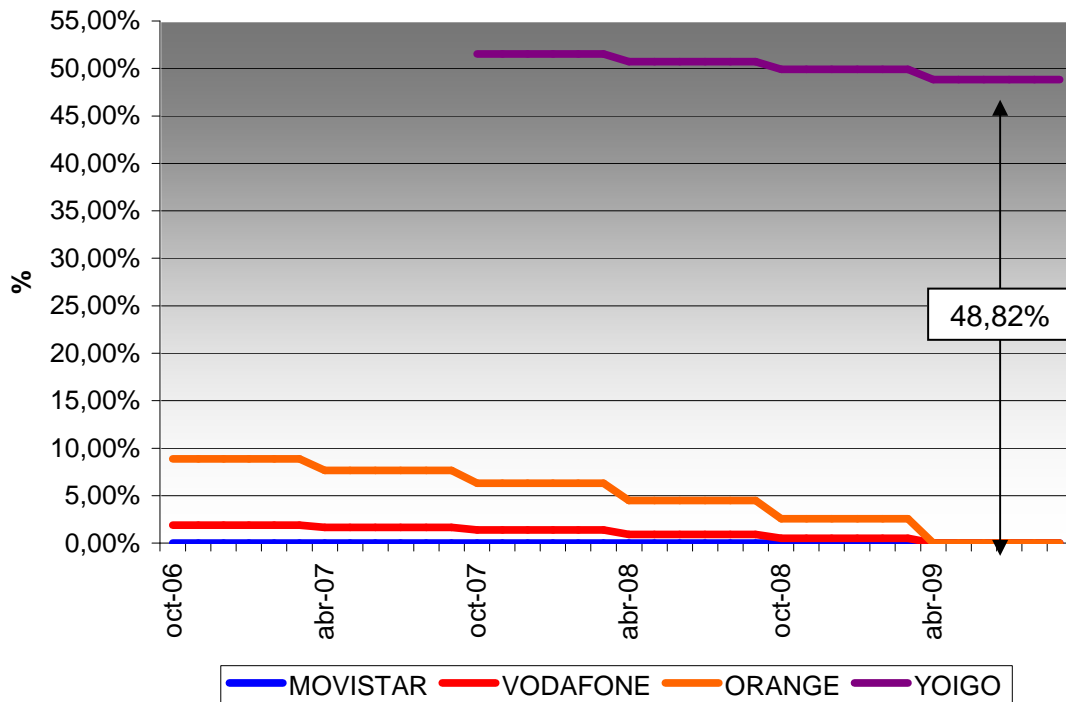


Figura 2.7 Evolución del diferencial de precio medio por operador PSM durante el primer *glide-path*

También es importante destacar que la CMT inició en octubre de 2007 el procedimiento por el cual proponía designar como operadores con posición de dominio a todos los OMV completos que iniciasen su actividad en el mercado. La CMT proponía las mismas obligaciones que se impusieron a YOIGO, con la diferencia de que para estos operadores se materializarían en unos precios de terminación iguales a los de los respectivos OMR anfitriones.

La labor regulatoria de la CMT sobre el servicio de terminación de voz ha continuado desde la aprobación del primer *glide-path*. En julio de 2009, a raíz de la recomendación 2009/396/CE de la Comisión Europea sobre el tratamiento normativo de las tarifas de terminación de la telefonía fija y móvil en la Unión Europea [7], la CMT aprobó una resolución para la determinación de un segundo *glide-path* sobre el precio medio de terminación de voz [8]. Se resolvió que al final de éste segundo periodo de reducción progresiva, el precio medio de terminación fuese de 0,04 €/minuto para MOVISTAR, VODAFONE, ORANGE y los OMV completos que utilicen su red de acceso, lo que se traduce en una reducción del 43%. Para YOIGO el precio final propuesto fue de

0,04976 €, lo que supone un descenso del 52% respecto del precio al final del primer *glide-path*. A continuación mostramos una tabla con los precios medios propuestos para YOIGO y el resto de operadores móviles con red.

	16 oct 2009 – 15 abr 2010	16 abr 2010 – 15 oct 2010	16 oct 2010 – 15 abr 2011	16 abr 2011 – 15 oct 2011	16 oct 2011 – 15 abr 2012
YOIGO	0,091182	0,078372	0,067361	0,057898	0,049764
RESTO	0,061270	0,055074	0,049505	0,044500	0,040000

Tabla 2.3 Segundo *Glide-path*: evolución de los precios medios máximos de terminación (€/minuto)

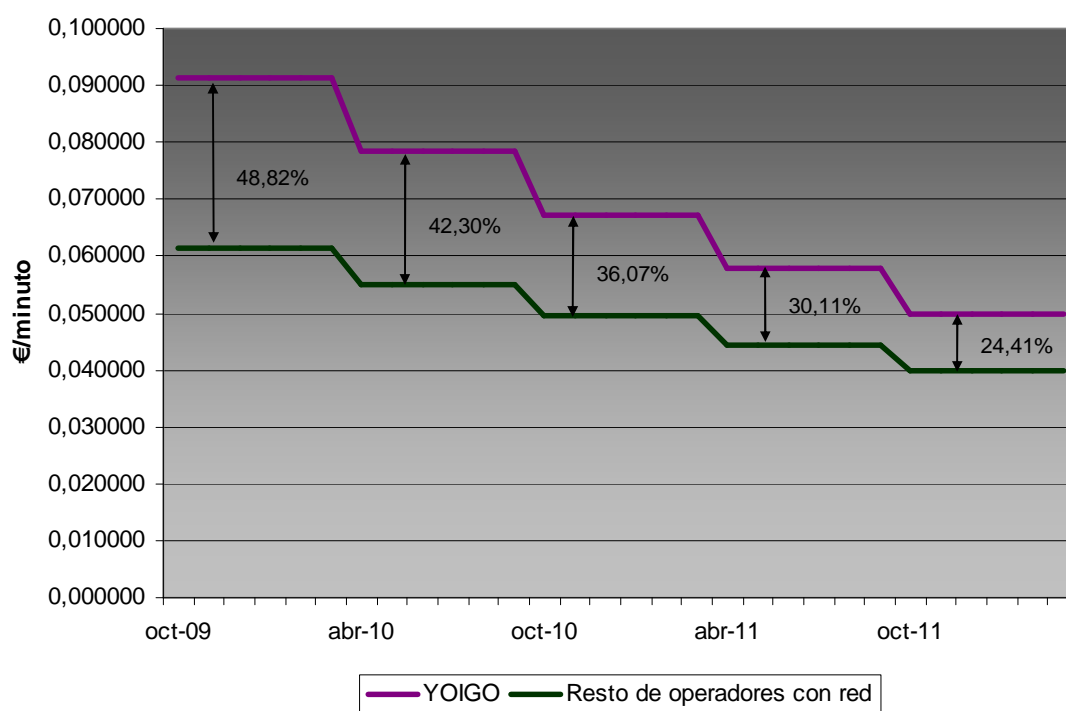


Figura 2.8 Segundo *Glide-path*: diferencial de los precios medios máximos de terminación

La CMT considera justificado que YOIGO tenga un precio medio máximo de terminación algo superior al del resto de operadores de red, debido a que este operador entró mas tarde en el mercado y, en consecuencia, no cuenta con las mismas economías de escala y presenta unos costes de red superiores a los de sus competidores. No obstante, con el segundo *glide-path* propuesto se elimina una parte la asimetría entre de YOIGO y el resto de operadores, que al final del primer *glide-path* es del 48,82%. De esta forma, al final del periodo propuesto, YOIGO contará con un diferencial del 24,41% con respecto a los

precios medios máximos del resto de los operadores móviles, tal como queda reflejado en la figura anterior.

La duración del nuevo *glide-path* será de dos años y medio, de forma que expirará el 15 de abril de 2012, permitiendo así que los precios de terminación en las redes móviles se pudieran volver a ajustar antes del 31 de diciembre de 2012, fecha que se considera como objetivo final en la Recomendación de la Comisión Europea sobre los precios de terminación.

La conclusión más importante que se obtiene de este contexto regulatorio es que todos los operadores móviles con red han calculado sus tarifas de terminación cumpliendo la limitación de precio medio impuesta por la CMT. Como se verá en el capítulo 3, el volumen de negocio que se genera por el tráfico de terminación es enorme, y supone una parte muy importante tanto de los ingresos como de los costes totales de un operador móvil con red. Por lo tanto, es fundamental la optimización de las tarifas de terminación, ya que repercuten de forma directa y con gran relevancia en las cuentas de resultados del operador móvil. De forma complementaria, la predicción de éste tráfico no sólo es necesaria para la optimización de tarifas de terminación, sino que también es muy importante a la hora de calcular los presupuestos anuales de los operadores móviles de red, debido al flujo monetario que crea. Como ya hemos venido indicando con anterioridad, la optimización de las tarifas de terminación y la predicción del tráfico son la base del proyecto que se presenta.

Para explicar la relación entre el precio medio máximo impuesto por la CMT y las tarifas nominales de terminación, utilizamos como ejemplo el caso de MOVISTAR para el periodo de abril a septiembre de 2009. En este periodo, el precio medio máximo es de 0,07€/minuto, y la propuesta de tarifas de MOVISTAR que fue aprobada por la CMT fue la siguiente [9]:

- *Horario Normal* (de lunes a viernes, no festivos de ámbito nacional de ocho a veintidós horas y sábados no festivos de ámbito nacional de ocho a catorce): 0,066462 €/minuto, facturándose un minuto de conversación completo para duraciones iguales o inferiores al minuto y efectuándose el cómputo por segundos para duraciones superiores.
- *Horario Reducido* (de lunes a viernes, de veintidós a ocho horas; sábados de cero a ocho horas y de catorce a veinticuatro horas,

domingos y festivos de ámbito nacional, durante todo el día): 0,052500 €/minuto, facturándose un minuto de conversación completo para duraciones iguales o inferiores al minuto y efectuándose el cómputo por segundos para duraciones superiores.

Tal como se detallará en el capítulo 3, para comprobar la validez de estas tarifas de forma que se obtuviese un precio medio menor o igual a 0,07€/minuto, la CMT las aplicó sobre el tráfico de terminación en la red de MOVISTAR en el periodo comprendido entre mayo de 2005 y abril de 2006. La CMT obtuvo esta información a partir de un requerimiento de información que trasladó a MOVISTAR en mayo de 2006 (VODAFONE y ORANGE recibieron requerimientos similares). Es importante destacar que el hecho de que las tarifas nominales se calculen a partir de datos de tráfico de terminación predeterminados, es lo que da pie a la aplicación de técnicas de optimización del cálculo de dichas tarifas.

Una vez adelantado el marco regulatorio para el eje central del proyecto, comentamos brevemente la evolución de la regulación de la itinerancia internacional. En junio de 2007, el Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea aprobaron el Reglamento CE 717/2007 [10] por el cual pasaban a regularse directamente tanto las tarifas minoristas como mayoristas del servicio de itinerancia internacional dentro de todo el territorio comunitario. Estas nuevas tarifas, bautizadas con el nombre de “Eurotarifas”, representaron una fuerte reducción de los precios vigentes en el mercado, y se aplicaron de forma obligatoria a todos los operadores a partir del 30 de agosto de 2007. Con todo lo anterior se aprecia que a lo largo de 2007, el mercado afrontó una serie de novedades que provocaron cambios significativos en la regulación del mercado mayorista. Éstas fueron la reducción de los precios de los servicios mayoristas (itinerancia internacional y terminación nacional) y la irrupción de nuevos operadores a través de la creación de la figura del operador OMV.

2.2. COMUNICACIONES FIJAS

En este apartado se presentan los servicios mayoristas prestados por los operadores de redes fijas. En primer lugar se analizan los servicios de

interconexión necesarios para el intercambio de tráfico entre operadores, en sus diferentes modalidades. En segundo lugar se analiza el servicio de alquiler de circuitos, que consiste en la puesta a disposición de terceros de una cierta capacidad de transmisión entre dos puntos, ya sea para enlazar con el cliente final o entre nodos de la red troncal del operador. Y por último, se describen los servicios de transmisión de datos, que incluyen las líneas dedicadas a datos, sea cual sea la tecnología empleada.

2.2.1. Servicios de interconexión de tráfico

De forma similar al mercado de comunicaciones móviles, los servicios de interconexión en redes fijas permiten a los operadores intercambiarse el tráfico originado en su red y con destino la red de otro operador. Los servicios de interconexión se pueden dividir en las siguientes categorías:

- Servicio de acceso, en el que el operador que suministra la línea al abonado obtiene un ingreso por entregar al operador interconectado el tráfico de selección de operador, numeraciones cortas, acceso a Internet de banda estrecha (909) y la componente de acceso de los servicios de red inteligente.
- Servicio de terminación de llamadas con origen en otro operador de red fija, de red móvil o internacional, que suponen un ingreso para el operador de red fija por terminar llamadas en su red. Esta categoría incluye el tráfico de terminación a números cortos y acceso a Internet de banda estrecha (909).
- Servicio de tránsito, en los que el operador de red fija cursa las llamadas que le entrega un operador con el que está interconectado para que las entregue a un tercer operador con el que el primero no está interconectado. Este tercer operador puede ser nacional o internacional.
- Otros servicios, entre los que se incluyen los servicios de interconexión de red inteligente, los de información telefónica, etc.

De forma pareja al caso de redes móviles, actualmente existen en España dos modalidades de interconexión en redes fijas: la interconexión por tiempo e interconexión por capacidad. Tal como se adelantó al presentar el mercado en redes móviles, en la interconexión por tiempo, los servicios de

interconexión se facturan en función del tráfico cursado en minutos, y en la interconexión por capacidad, se factura sólo por enlace contratado, independientemente del volumen de minutos cursados a través del enlace. Hay que señalar, sin embargo, que sólo los servicios de terminación y acceso (incluida la componente de acceso de los servicios de red inteligente) pueden cursarse mediante interconexión por capacidad. Es decir, los servicios de tránsito y el resto de servicios se cursan en su totalidad mediante la interconexión por tiempo. Por otra parte, cabe destacar que hasta 2007 el servicio de interconexión por capacidad se ofrecía únicamente por Telefónica. Esto es debido a que por su condición de operador exclusivo durante tanto tiempo, era el que poseía la práctica totalidad de las infraestructuras necesarias para la prestación de los servicios sobre redes fijas.

Con objeto de controlar y facilitar la incorporación de nuevos agentes en el mercado (denominados normalmente como operadores alternativos), la CMT requirió la creación de una oferta de servicios que estuviese sujeta a su regulación, dando lugar a la especificación OIR (Oferta de Interconexión de Referencia) [11].

Finalmente, podemos comentar que ambos modelos de interconexión se suelen utilizar de forma combinada, escogiendo para cada punto de interconexión una modalidad concreta en función del volumen y perfil del tráfico. Estos dos parámetros afectan al número de minutos por enlace, que es el factor que finalmente decanta la elección entre un modelo u otro.

2.2.2. Servicios de alquiler de circuitos a operadores

El servicio de alquiler de circuitos a nivel mayorista es el que se prestan entre sí los operadores para disponer de una cierta capacidad de transmisión entre dos puntos. Pueden ser circuitos terminales para enlazar el nodo del operador con su cliente final ubicado donde el operador no tiene red propia, o circuitos troncales. De esta manera, los servicios de alquiler de circuitos pueden agruparse en dos grandes bloques, teniendo por un lado el alquiler de circuitos alta, media y baja capacidad, que son ofrecidos por operadores como ONO, Orange o el grupo Abertis. Por otro lado tenemos el servicio de capacidad portadora, que se ofrece casi en exclusividad Telefónica.

De forma similar a la OIR para los servicios de interconexión, Telefónica ofrece una oferta regulada para el servicio de alquiler de circuitos a través de la especificación ORLA (Oferta de Referencia de Líneas Alquiladas Terminales) [12] a todos los operadores de redes públicas de comunicaciones electrónicas.

2.2.3. Servicios de transmisión de datos a operadores

Los servicios mayoristas de transmisión de datos incluyen los servicios de líneas dedicadas a datos de cualquier tipo de tecnología, y también los servicios de acceso mayorista a Internet prestados a empresas. Es preciso comentar que todos estos servicios se ofrecen por parte de Telefónica al resto de operadores en un contexto regulado a través de otra especificación, denominada en este caso OBA (Oferta de Bucle de Abonado) [13].

Cabe destacar que el volumen de negocio para operadores de comunicaciones fijas sobre servicios de transmisión de datos se viene reduciendo de forma drástica en los últimos cuatro años debido a la inversión de los operadores en la infraestructura propia.

2.2.4. Regulación y evolución del mercado

En este apartado se analiza la regulación y la evolución de las comunicaciones fijas de los servicios mayoristas. Se examina la situación actual de estos mercados, que es el resultado de las pasadas acciones regulatorias así como de las estrategias de negocio de los operadores.

En cuanto a los servicios de interconexión de redes fijas, es necesario indicar que los operadores emplean mayoritariamente el modelo de interconexión por capacidad, ya sea en los servicios de acceso y/o terminación de tráfico de voz, dado que en ambos casos y con una buena estimación de las demandas, este modelo es más ventajoso económicamente. Originariamente fue la interconexión por capacidad la que permitió a los operadores confeccionar tarifas planas de los servicios de voz, tan populares en los servicios empaquetados (telefonía, Internet y televisión) en el mercado minorista.

Los servicios de alquiler de circuitos entre operadores se han visto afectados por el hecho de que en los últimos años ha habido un incremento en el volumen de datos que requieren las nuevas aplicaciones y sistemas informáticos. Esto ha resultado en incrementos de la capacidad y de la velocidad de las redes, lo último para no prolongar los tiempos de espera o las cargas. Para poder soportar este incremento en las capacidades en las redes de acceso a los usuarios finales se requiere un incremento proporcional de la capacidad en las redes troncales de los operadores.

Consciente de esta evolución, la CMT disminuyó el precio de estos circuitos, en las cuotas de alta y mensual, en la aprobación de la oferta de referencia de líneas alquiladas (ORLA) que anteriormente estaban regulados por la OIR. Gracias a estas nuevas ofertas, los operadores alternativos tendrán más opciones en la contratación de líneas alquiladas y con diferentes tipos de interfaces, pudiéndose adaptar mejor a su red troncal a las necesidades presentes o futuras.

Por último, respecto de los servicios de transmisión de datos, debemos mencionar que en 2007 se añadió la posibilidad para los operadores alternativos de utilizar el alquiler del bucle sin servicio telefónico básico de Telefónica (STB) al incluirse esta nueva modalidad de servicio mayorista en la oferta de acceso al bucle de abonado publicada en septiembre de 2006. Este tipo de servicio mayorista permite a los operadores prestar con tecnología IP servicios de voz y, en particular, les brinda la posibilidad de empaquetar estos servicios con los de banda ancha.

2.3. SERVICIOS DE ACCESO A INTERNET

Es ahora evidente que el desarrollo de las telecomunicaciones y de la sociedad de la información es uno de los aspectos fundamentales para el desarrollo económico y competitivo de un país. Tal y como ha venido sucediendo en los últimos años, el acceso a Internet no ha parado de crecer en la Unión Europea y más concretamente en España. El crecimiento del número de dispositivos que acceden a Internet, se ha visto favorecido por el desarrollo de nuevas aplicaciones, servicios y redes.

En la actualidad, el negocio entre operadores por servicios de Internet se centra en la banda ancha. Los servicios mayoristas de banda ancha permiten a los operadores que no disponen de red propia acceder a un conjunto de servicios regulados y no regulados para poder ofrecer servicios de banda ancha al consumidor final. Entre los servicios regulados, existe el acceso indirecto al bucle, cuyo principal proveedor es Telefónica, que ofrece estos servicios a través de sus ofertas de GigADSL y ADSL-IP, y el acceso directo a través de la desagregación del bucle de abonado. Entre los servicios no regulados, el más importante es el servicio mayorista de reventa.

2.3.1. Acceso mayorista a la línea telefónica

El servicio mayorista de reventa consiste en la provisión por parte de un operador a otro del mismo servicio de banda ancha que ofrece a sus clientes finales. En este caso, el operador comercializa la oferta y factura el servicio a su cliente. A diferencia del resto de modalidades de acceso mayorista, el operador no necesita ninguna inversión en infraestructuras. Este servicio mayorista es ofertado mayoritariamente por Telefónica.

2.3.2. Acceso directo al bucle de abonado

Respecto al servicio mayorista de desagregación de bucle, Telefónica ofrece las modalidades de bucle totalmente desagregado (mediante este servicio Telefónica cede el uso del par de cobre al operador en todo el rango de frecuencias del par) y bucle desagregado compartido (Telefónica cede al operador el uso de las frecuencias altas del par, por encima de la banda utilizada por el servicio telefónico, quedando la utilización de las bajas frecuencias a cargo de Telefónica para ofrecer, bien telefonía básica STB bien acceso básico RDSI).

En la revisión de la OBA de 2006 se introdujo una tercera modalidad de desagregación, denominada acceso compartido sin STB, es decir, sin el abono telefónico con Telefónica. En esta modalidad de desagregación, se utiliza la arquitectura de cableado en la central propia de los bucles compartidos, por lo que no dispone de todo el rango de frecuencias para ofrecer sus servicios, sino sólo de las frecuencias altas. Este mecanismo es empleado por algunos

operadores alternativos para ofrecer servicios como dar una factura única a sus clientes sobre la base de infraestructuras de acceso compartido y sin interrupción del posible servicio preexistente basado en acceso compartido.

2.3.3. Acceso indirecto al bucle de abonado

El acceso indirecto al bucle de abonado es una modalidad de acceso a través de la tecnología xDSL que permite a un operador ofrecer un servicio de banda ancha utilizando los equipos de acceso de Telefónica. Telefónica dispone de la oferta regulada OBA de servicios mayoristas de xDSL a través de puntos de interconexión a su red disponibles para los operadores alternativos.

La interconexión con la red de Telefónica puede realizarse a nivel ATM en al menos 109 puntos en distintas localizaciones o a nivel IP nacional en dos puntos, Barcelona y Madrid. Telefónica comercializa estas dos modalidades de servicio mayorista denominándolas GigADSL y ADSL-IP respectivamente. Además de Telefónica existen algunos operadores que también ofrecen el servicio de concentración ATM que previamente han adquirido de Telefónica, aunque su peso dentro de este negocio es muy pequeño.

2.3.4. Regulación y evolución del mercado

Los servicios de acceso a Internet de banda ancha han constituido uno de los mercados mayoristas en los que la actividad regulatoria de la CMT ha sido más intensa en los últimos años. La intervención de la CMT tuvo como objetivos, por una parte, la garantía de la plena disponibilidad de las prestaciones recogidas en la OBA, como elemento de primera importancia para el dinamismo e innovación de productos en el mercado minorista; y por otra, la puesta al día de los productos mayoristas de acceso indirecto, necesarios aún en una parte importante del territorio español, con una especial atención a la consistencia entre esa actualización y los incentivos que, desde la regulación, debían mantenerse al desarrollo de redes alternativas de acceso.

El avance en 2009 y 2010 en el despliegue de infraestructuras propias por parte de los operadores de cable y de los operadores alternativos de xDSL permitió a dichos operadores ofrecer un mayor número de servicios de banda

ancha, con mayor grado de diferenciación y con velocidades de conexión más elevadas. Sin embargo, la cobertura y alcance de estos servicios se limitaron a zonas geográficas concretas, por lo que, con la finalidad de poder ofrecer los servicios de banda ancha en todo el territorio nacional, los operadores tuvieron a su disposición los servicios mayoristas de acceso a la banda ancha.

2.4. SERVICIOS AUDIOVISUALES

El cambio tecnológico hacia la total digitalización de las señales audiovisuales ha abierto nuevas oportunidades de negocio en el mercado mayorista de infraestructuras para el transporte y la difusión de las señales de radio y televisión. El entorno de los servicios mayoristas se caracteriza por las progresivas ampliaciones de cobertura, la entrada de nuevos radiodifusores que demandan servicios mayoristas y un proceso de convergencia entre las distintas plataformas de televisión.

La obligación de alcanzar los niveles de coberturas fijados por los planes de despliegue de la TDT recae sobre los radiodifusores, que, en función de los plazos establecidos, deben ir contratando con los operadores de infraestructuras el mayor alcance poblacional que se exige en cada periodo. Para cumplir con estos compromisos de cobertura los radiodifusores necesitan cada vez más centros emisores que vayan expandiendo la cobertura de la TDT. Este hecho, sumado al aumento del número de radiodifusores según se van adjudicando los concursos de concesiones de TDT autonómicas y locales, ha influido de forma positiva la evolución del negocio en los últimos años.

2.4.1. Servicios de transporte de la señal audiovisual

El servicio de transporte de la señal audiovisual hace referencia a aquellos medios que facilitan el recorrido de la señal audiovisual hasta los centros de emisión y reemisión. Es importante destacar que esta actividad, a diferencia de la difusión de la señal audiovisual, realiza transmisiones de señales punto a punto y que para ello se puede utilizar cualquier medio de transmisión o tecnología como las ondas terrestres, las fibras ópticas, el satélite o el cable.

Al ser un servicio unidireccional (punto a punto), y a diferencia de la actividad de difusión, esta actividad no está relacionada con la utilización del espectro de radiofrecuencias: cualquier operador que disponga de redes de telecomunicaciones podría prestar este tipo de servicios sin recurrir al uso del espectro. Ello redundaría en una mayor facilidad para la entrada de potenciales nuevos oferentes del servicio de transporte de las señales audiovisuales.

2.4.2. Servicios de difusión de la señal audiovisual

El grueso de los servicios de difusión proviene en su mayor parte de la actividad de difusión de las programaciones de los radiodifusores. Este mercado mayorista se caracteriza por que cada prestador del servicio de difusión está habilitado para emitir en un tipo de señal y en un medio concreto, ya sea por ondas terrestres, vía satélite o cable.

Cabe indicar que la participación de los servicios de difusión de la señal audiovisual sobre el total de los ingresos derivados por servicios mayoristas audiovisuales no ha parado de incrementarse en los últimos años. Las causas de este crecimiento son varias. Por un lado, siguiendo con los planes establecidos en la legislación, los radiodifusores han ido acometiendo un aumento de la cobertura de la TDT. Asimismo, se ha procedido a ampliar la cobertura analógica de los radiodifusores que emiten en *simulcast* (es decir, tanto por el medio analógico como por el digital) en el ámbito nacional. Por último, comentar que la renegociación de los contratos que mantienen los grandes radiodifusores con operadores de red también ha influido en el crecimiento del negocio de los servicios de difusión.

2.4.3. Regulación y evolución del mercado

En los dos últimos años ha habido importantes cambios en el sector audiovisual español. Por un lado, se han retirado las emisiones analógicas, para entrar en un entorno completamente digital de televisión. También se han producido cambios en la regulación del sector, que tiende a modernizarse y a adaptarse a los cambios tecnológicos que van apareciendo. Entre estos cambios está la ley de financiación de la Corporación de Radio Televisión Española, que suprimió la emisión de publicidad. También se ha iniciado la

regulación de la TDT de pago y se ha abierto las puertas a las fusiones entre operadores de televisión.

En cuanto a la evolución económica del sector, después de haber alcanzado sus cotas máximas de ingresos en el año 2007, acusó en 2008 los inicios de una crisis económica que se ha prolongado a lo largo de todo el 2009 y el 2010, y que ha incidido de forma importante en los ingresos percibidos. Como consecuencia de todo lo anterior, muchas de las empresas que operan en el sector están reestructurando y adaptando sus modelos de negocios para aprovechar al máximo las oportunidades que se derivan de la transición al entorno digital, de los continuos avances tecnológicos y de los recientes cambios en el escenario regulatorio.

CAPÍTULO 3

TERMINACIÓN DE VOZ EN RED MÓVIL. CASO DE ESTUDIO

Uno de los negocios más importantes dentro del mercado mayorista de comunicaciones móviles es el que surge por la facturación de los servicios de interconexión por terminación de tráfico. Tal como ya adelantamos en el capítulo 2, se considera terminación a cualquier evento de tráfico móvil (llamada de voz, datos, SMS, MMS, etc.) entre usuarios finales de dos operadores de red distintos (fijos o móviles), generándose un flujo monetario desde el operador que genera el evento hacia el operador que lo recibe.

Dentro de los servicios de interconexión, es especialmente relevante el servicio de terminación de voz en red móvil. El objetivo de éste capítulo es presentar todos los elementos que un operador móvil de red debe considerar para calcular las tarifas nominales que maximicen sus ingresos por este servicio. El proceso de maximización de ingresos implica la predicción del tráfico de terminación y la optimización de las tarifas nominales.

Contenido del capítulo

En primer lugar caracterizaremos el servicio de terminación de voz para seguidamente analizar el marco regulatorio y la normativa específica a la que está sujeto. Finalmente, plantearemos un caso de negocio concreto en el que entrarán en juego todos los elementos descritos. Para la caracterización del servicio de terminación de voz, nos centraremos en los siguientes aspectos:

- Escenarios de tráfico de terminación. Comenzaremos viendo la manera en que tanto la CMT como los operadores desglosan los diferentes escenarios de tráfico, e introduciremos el concepto de APC (Agrupación Para Consolidar), que es la estructura de datos que utilizan los operadores para identificar y facturar los diferentes tipos de tráfico.
- Evolución del servicio de terminación de voz en España. Veremos cómo el efecto de las bajadas progresivas en las tarifas de terminación impuestas por la CMT ha corregido los ingresos percibidos por los operadores en los últimos tiempos, aún habiendo aumentado el tráfico de forma monótona.
- Variables relevantes en el tráfico de terminación de voz. Analizaremos la manera en que los patrones de uso del servicio dependen de variables económicas, comerciales, demográficas y sociales. Se verá como esas variables se traducen en fenómenos de periodicidad, estacionalidad y tendencia, y se concluirá que es conveniente interpretar estos factores en función de variables temporales.

La descripción del marco regulatorio y la normativa específica aplicada al servicio de terminación de voz se ha desglosado en los siguientes puntos:

- Declaración de dominancia de los operadores móviles. Contabilidad de costes. Expondremos los fundamentos empleados por la CMT para la declaración de dominancia de los operadores móviles. Describiremos las obligaciones de los operadores derivadas de esa declaración, entre las cuales destacaremos la relativa a la orientación de las tarifas nominales de terminación hacia los costes reales de prestación del servicio.

- Esquemas de tarificación del servicio de terminación de voz. Veremos la forma en que se realiza la tarificación mayorista del tráfico de terminación, detallando el esquema básico, el basado en la aplicación de un término de establecimiento y el basado en la determinación de un periodo de franquicia.
- Orientación a costes. Determinación del precio medio y ajuste de las tarifas nominales. Describiremos el proceso empleado por la CMT para regular las tarifas nominales de terminación, y veremos cómo los operadores han podido proponer los valores de estas tarifas cumpliendo la restricción dada por el precio medio máximo de terminación. Para ello, se describirá en detalle el procedimiento de cálculo del precio medio a partir de la tarifa típica.

Por último expondremos un caso de negocio que permita plantear un escenario válido para la aplicación de los métodos de predicción y optimización que se describirán en el capítulo 4 y que se aplicarán en el capítulo 5. Para esto, se ha creado un operador móvil ficticio para el que se ha generado un histórico de datos aleatorios de tráfico de terminación siguiendo unos perfiles estándar. El caso de negocio consta de los siguientes apartados:

- Descripción general. Situaremos el operador móvil ficticio en los ámbitos regulatorio y de negocio adecuados. Supondremos que se trata de un OMV con acuerdo de acceso con ORANGE, y que el periodo regulado va desde octubre de 2008 hasta abril de 2009. Además, le asignaremos una cuota de mercado y un volumen de ingresos.
- Análisis de impacto del procedimiento de maximización de ingresos de terminación. Nos centraremos en el impacto económico en las cuentas del operador ficticio. Veremos cómo la eficiencia del procedimiento puede alterar los resultados globales del operador de forma significativa.
- Relación coste/beneficio. Indicaremos que el coste de implementación del sistema de maximización de ingresos es constante, por lo que la relación coste/beneficio depende sólo de los resultados económicos esperados.

- Riesgos y posibles contingencias. Destacaremos que las posibles desviaciones en la predicción de los patrones de tráfico son la mayor fuente de riesgo del procedimiento de maximización de ingresos, mientras que el volumen absoluto de tráfico predicho no influye.
- Conclusiones del estudio. Resumiremos los resultados más importantes del estudio, entre las que destaca la necesidad de optimizar las tarifas nominales.

3.1. SERVICIO DE TERMINACIÓN DE VOZ

Según se indica en el informe anual de la CMT correspondiente al año 2008 [14], durante ese periodo el servicio de terminación en de voz en red móvil generó unos ingresos de 2.722,27 Millones de Euros para los operadores móviles. Esta gran cantidad supuso el 14,51% del total de ingresos de estos operadores (incluyendo servicios minoristas y mayoristas), que fue de 18.755,78 Millones de Euros. Como se puede observar, el volumen de negocio que aglutina el servicio de terminación de voz le convierte en una de las “joyas de la corona” dentro de cualquier operador móvil.

La importancia dentro del sector del servicio de terminación y el entorno competitivo en el que se desarrolla este negocio han provocado que esté fuertemente regulado en España por parte de la CMT, y en el resto de Europa por los respectivos organismos oficiales, siguiendo las pautas marcadas desde Unión Europea. Este conjunto de factores hace que los operadores móviles de red (ya sean con licencia radio o bien operadores móviles virtuales completos) dediquen recursos específicos para el análisis, la caracterización y la gestión regulatoria del servicio de terminación de voz. En los siguientes puntos describimos estos aspectos.

3.1.1. Escenarios de tráfico de terminación de voz

Desde el punto de vista regulatorio, la CMT plantea el servicio de terminación de voz para cada operador de red como un conjunto de escenarios de tráfico diferenciados en función del origen y el destino de la llamada. Por una parte, se separa el tráfico con destino a los clientes de los OMV

prestadores de servicio que estén albergados por el operador de red (y con los que el operador de red no tiene relación comercial directa), mientras que el resto del tráfico de terminación (llamadas con destino a clientes propios del operador de red) se clasifica según la localización del usuario que realiza la llamada (red nacional o red extranjera). Cualquiera de estos tres casos es considerado tráfico de terminación en red móvil, y por lo tanto, el operador receptor del tráfico facturará cada llamada aplicando los precios de terminación vigentes, que son únicos. Seguidamente explicamos con ejemplos esta clasificación en tres escenarios.

- Terminación en OMV. Incluye el tráfico generado por todas las llamadas de voz originadas en una red española o extranjera, ya sea fija o móvil, con destino a clientes de un operador móvil virtual prestador de servicio albergado en una red diferente de la red de origen. Esto se producirá, por ejemplo, cuando un cliente de MOVISTAR llame a un cliente de MÁSmovil, que está albergado en la red de ORANGE. En este caso, MOVISTAR pagará por la llamada a ORANGE de acuerdo con los precios nominales de terminación de ORANGE, independientemente de que el cliente de destino sea un prestador de servicio y de los posibles acuerdos comerciales entre el prestador de servicio (MÁSmovil) y el operador anfitrión (ORANGE).
- Terminación nacional. Incluye el tráfico generado por todas las llamadas de voz originadas en una red española, ya sea fija o móvil, con destino a clientes de un operador móvil con red propia. Esto se producirá, por ejemplo, cuando un cliente de MOVISTAR llame a un cliente de VODAFONE o cuando un cliente de JAZZTEL llame a uno de SIMYO. Este es el escenario más común, en que las llamadas se realizan con destino a clientes directos de redes móviles españolas.

Sin embargo, dentro de la terminación nacional también se incluye el tráfico de tránsito nacional, lo cual puede producirse cuando el operador origen de la llamada y el operador móvil destinatario de la misma no tienen formalizado el pertinente acuerdo de interconexión. En este caso, a efectos de facturación el operador móvil que recibe la llamada la considerará de igual forma a como si se hubiese generado

por el operador de tránsito. Así, el operador de tránsito pagará al operador móvil receptor de la llamada como si se hubiese generado en su propia red, independientemente del acuerdo que tenga con el operador origen de la llamada.

Cabe indicar que desde el punto de vista regulatorio no está permitido realizar descuentos por tráfico de tránsito. Es decir, el operador destinatario de una llamada no puede ofrecer un precio de terminación menor a un operador de tránsito por entregarle tráfico procedente de una tercera red. Esto podría generar un conflicto de competencia y la CMT podría sancionar a las partes implicadas.

- Terminación internacional. Incluye el tráfico generado por todas las llamadas de voz originadas en una red extranjera, ya sea fija o móvil, con destino a clientes de un operador móvil español con red propia. Esto se producirá, por ejemplo, cuando un cliente de Telecom Italia llame a un cliente de MOVISTAR.

Desde el punto de vista de los operadores para la facturación de los diferentes servicios de interconexión, y en particular para el servicio de terminación de voz, resulta necesario organizar y agrupar convenientemente los datos recogidos sobre el tráfico intercambiado. Esta necesidad, surgida tras la liberalización del sector de las comunicaciones, dio lugar a un estándar específico que consigue estos objetivos a partir del tipo de servicio, la ruta del punto de interconexión entre los operadores implicados y la hora y duración de la llamada. El estándar se basa en unas estructuras de datos denominadas Agrupaciones Para Consolidar (APC). Una APC está constituida por una parte denominada “comercial” (APC Comercial o APCC) y otra parte denominada “estructural” (APC Estructural o APCE). Una APCE define unívocamente cada ruta utilizada en la interconexión entre los dos operadores, definiéndose por la provincia y distrito donde se ubica punto de interconexión, las centrales de cada operador que gestionan ese tráfico y el tipo de tráfico intercambiado. Una APCC define un conjunto de llamadas que transita por la ruta definida en la APCE durante un intervalo de tiempo concreto.

El formato de las APC está definido en la Oferta de Interconexión de Referencia, OIR, lo cual permite que los operadores acuerden entre sí de forma

estandarizada y sencilla tantas APC como sean necesarias para identificar y facturar cada tipo de tráfico intercambiado entre ellos. Como consecuencia adicional, las APC facilitan que cada operador pueda identificar de forma sencilla todo el tráfico de terminación de voz que recibe.

Sin embargo, el uso de las APC está limitado a tareas de facturación y consolidación, ya que aportan demasiado detalle de cara al manejo de los datos para tareas de alto nivel, como puede ser la realización de previsiones o el cálculo de presupuestos. Para este tipo de tareas, los operadores suelen agrupar las APC que conforman el tráfico de terminación de voz según los siguientes escenarios.

- Origen Internacional. Incluye el tráfico generado por todas las llamadas de voz entrantes a una red móvil dada, originadas en una red extranjera, ya sea fija o móvil. Se corresponde con el tráfico de Terminación Internacional según la nomenclatura de la CMT.
- Origen móvil. Engloba el tráfico generado por todas las llamadas de voz entrantes a una red móvil dada, entregadas por otra red móvil española.
- Origen fijo. Engloba el tráfico generado por todas las llamadas de voz entrantes a una red móvil dada, entregadas por una red fija española.

La suma del tráfico de origen móvil más el tráfico de origen fijo es el tráfico off-net de terminación de voz, y considerando la nomenclatura de la CMT, se corresponde con la suma del tráfico de Terminación Nacional más el tráfico de Terminación en OMV.

3.1.2. Evolución del servicio de terminación voz en España

El tráfico asociado al servicio de terminación de voz no ha parado de incrementarse desde el inicio de la telefonía móvil de segunda generación en España. Sin embargo, el ritmo de crecimiento de los ingresos no ha seguido la misma tendencia, tal como se aprecia en la siguiente figura, en la que se expone la evolución del tráfico de terminación de voz del total de operadores móviles con red (en millones de minutos) junto con la evolución de los ingresos asociados (en millones de €) [14], [15].

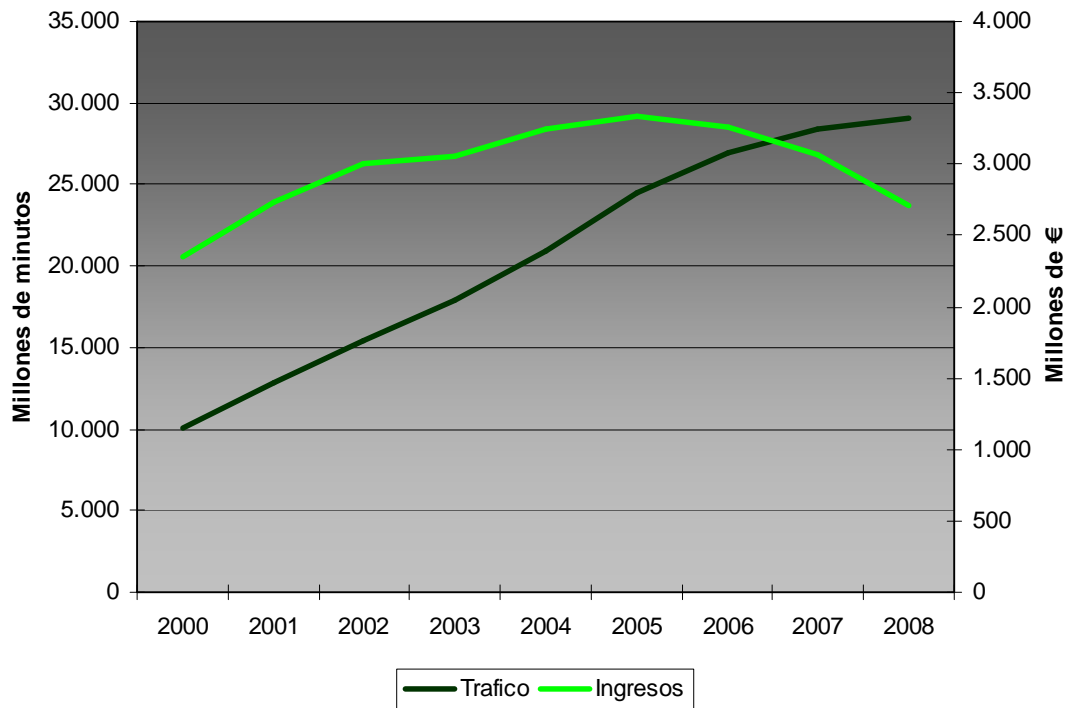


Figura 3.1 Evolución anual del tráfico e ingresos de terminación de voz en España

Se puede afirmar que el motivo fundamental por el que el tráfico de terminación de voz y los ingresos asociados no han evolucionado de forma pareja es la regulación a la que se han visto sometidas las tarifas nominales de terminación. Si bien estos precios han estado sujetos a la aprobación de la CMT desde la aparición de los diferentes operadores móviles, ésta no ha sido ejercida de la misma manera en todo el periodo. Hasta octubre del año 2006 la CMT se limitó a fijar unas tarifas nominales para los operadores con peso significativo en el mercado, de forma que se cumpliese la legislación vigente para el sector. Sin embargo, tal como se adelantó en el capítulo 2, a partir de octubre de 2006 la CMT comenzó a aplicar el primer mecanismo de reducción progresiva (primer *glide-path*) para el periodo comprendido entre octubre de 2006 y octubre de 2009, lo cual ha influido de forma determinante para que la pendiente del tráfico no fuese pareja a la de los ingresos. Esto también se aprecia en la siguiente gráfica, en la que se incluye el ingreso medio del mercado por terminación de voz (en Euros por minuto) junto con los precios medios máximos marcados por la CMT para MOVISTAR, VODAFONE y ORANGE desde el cuarto trimestre del 2006 hasta el cuarto trimestre del 2008

(también en Euros por minuto). Como se ve, hay un alto grado de correlación entre las pendientes de los parámetros descritos.

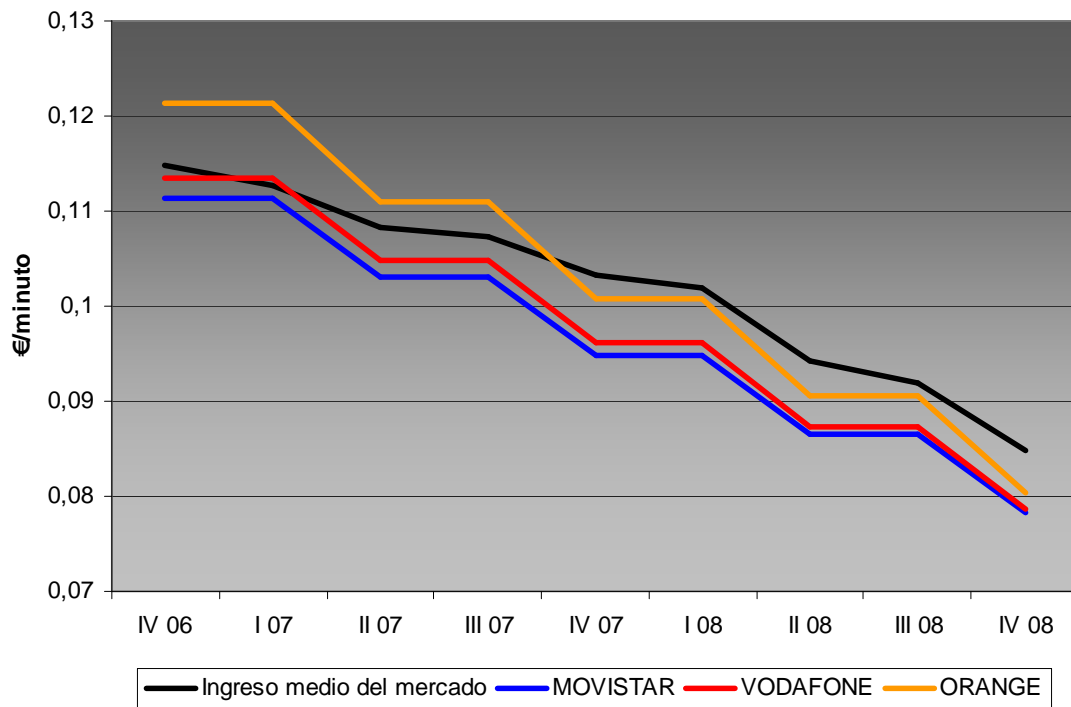


Figura 3.2 Evolución de los ingresos y precio medio del tráfico de terminación de voz en España

Si ahora analizamos el servicio de terminación de voz en términos de la evolución temporal del tráfico, en la figura 3.1 se aprecia que hasta el año 2005, este tráfico se incrementaba de forma prácticamente lineal. Sin embargo, en los años sucesivos se aprecia una ligera corrección, siendo más marcada para el año 2008. Para analizar esta corrección en más detalle podemos desglosar el tráfico de terminación de voz desde el año 2004 al 2008 en función del origen de las llamadas [14], tal como se muestra en la figura 3.3. En esta figura, el tráfico de terminación de voz es la suma del tráfico entregado por operadores móviles nacionales (Origen Móvil) con el tráfico entregado por operadores fijos (Origen Fijos) y con el tráfico de terminación proveniente de redes extranjeras (Origen Internacional). Se observa que la corrección en la curva de tráfico de terminación está propiciada por la disminución en el ritmo de crecimiento del tráfico entregado por redes móviles nacionales y por la reducción del tráfico proveniente de redes fijas, que ha ido cayendo paulatinamente desde el año 2005. Por otra parte, cabe destacar el incremento

prácticamente lineal que ha sufrido el tráfico originado en redes de fuera de España.

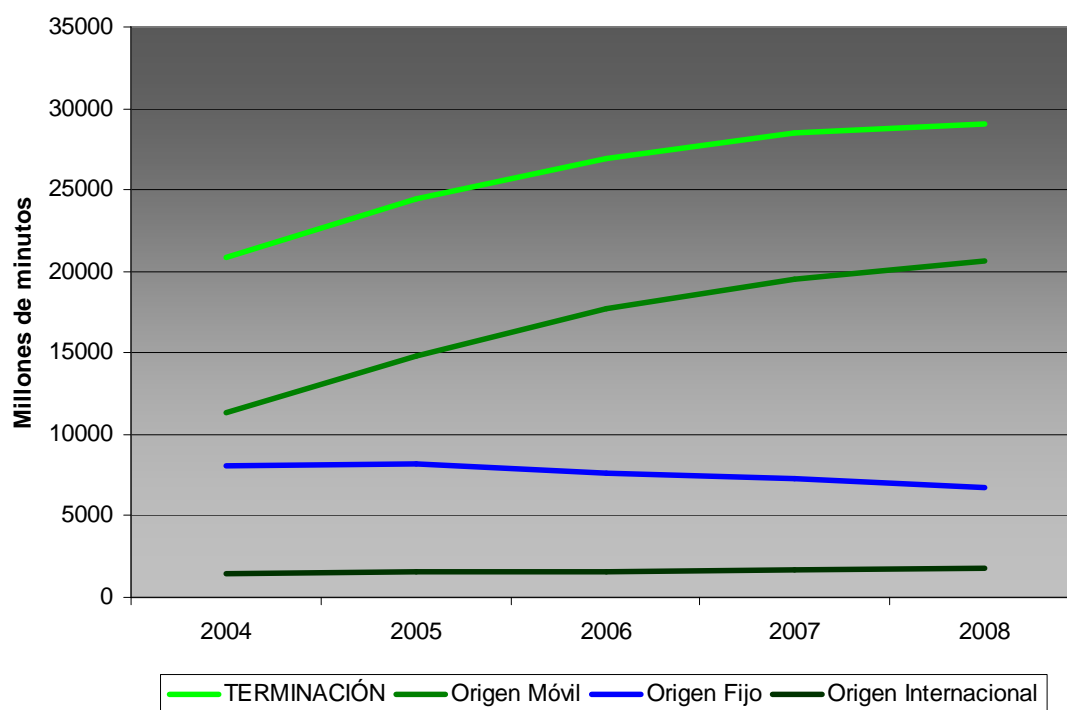


Figura 3.3 Evolución del tráfico de terminación de voz en España en función del origen

3.1.3. Variables relevantes en el tráfico de terminación de voz

Se ha demostrado de forma empírica en diferentes ocasiones [Hee07], [Ive05], que el uso de los servicios de comunicaciones está sujeto a una serie de patrones de consumo por parte de los usuarios. En general, estos patrones de consumo evolucionan en función de variables económicas, comerciales, demográficas y sociales.

Un ejemplo de la influencia de las variables económicas sobre los patrones de consumo es la desaceleración en el crecimiento que viene sufriendo en su conjunto el sector de las telecomunicaciones en 2008 y 2009. Esta desaceleración está motivada por la desfavorable coyuntura económica, lo cual se ha traducido en una ralentización en la ampliación del número de clientes y en un descenso en las tarifas de diferentes servicios, y que ha tenido como consecuencia que la facturación del conjunto del sector creciera en 2008 un 1,1% frente al 5,7% registrado en el año anterior [14].

La influencia de los factores comerciales se presenta de manera singular en el caso particular del servicio de terminación de voz, ya que el tráfico y los ingresos asociados no están generados por los clientes del operador correspondiente. Dicho de otra manera, la variación del tráfico y los ingresos de terminación dependerán de la variación en los patrones de consumo de clientes de otros operadores. Este hecho hace necesario el análisis de las ofertas comerciales de la competencia para poder identificar posibles cambios de tendencia en los patrones de tráfico recibido. Por ejemplo, la aparición de las tarifas planas en telefonía móvil es un factor comercial influyente sobre el tráfico de terminación. En julio de 2006, AMENA (ahora ORANGE) lanzó al mercado la primera tarifa plana en telefonía móvil; esta tarifa se caracterizaba por ofrecer un precio único para todo el tráfico de voz generado desde las 18h hasta las 8h, independientemente del operador de destino. Una consecuencia esperable de esta oferta comercial era el incremento del volumen de tráfico de terminación en las redes de otros operadores en la franja horaria en la que se ofertaba el servicio. Otro caso similar surge por las nuevas ofertas comerciales por parte de nuevos agentes en el mercado, como son los OMV. Muchos de estos operadores ofertan tarifas únicas, independientes del operador de destino y la hora en la que se realice la llamada (p. e., CARREFOUR MOVIL, SIMYO).

En los ejemplos anteriores, las ofertas comerciales eliminan barreras al consumo al independizar en cierta medida variables como el operador de destino o la hora de la llamada con la facturación al cliente final. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el efecto de estas campañas comerciales y posicionamientos estratégicos está fuertemente limitado por la inercia en los hábitos de consumo de los usuarios particulares y el condicionamiento que imprime la actividad empresarial. De hecho, la práctica totalidad de operadores de telefonía móvil segmentan su base de clientes entre clientes particulares y empresas, para poder ofrecer servicios diferenciados y cubrir las necesidades específicas para cada segmento, dando lugar incluso a áreas de negocio independientes dentro de la organización del operador. Esta primera división de la base de clientes entre particulares y empresas deja de manifiesto la relevancia de las variables sociales para la caracterización de los patrones de uso de la telefonía móvil.

Existe una gran cantidad de variables sociales susceptibles de ser consideradas al analizar el comportamiento del tráfico de telefonía móvil. En los departamentos de marketing de los operadores se suelen realizar estudios de mercado segmentando la base de clientes en función de si son particulares o de empresa, por el rango de edad, por la localización, etc. El manejo de un conjunto heterogéneo de multitud de variables como las descritas resulta muy complejo, implicando un elevado consumo de recursos para la obtención del conocimiento necesario y requiriendo el desarrollo de metodologías específicas para cuantificar cada una de las posibles variables relevantes. Esta complejidad se incrementa al considerar el caso particular del servicio de terminación de voz, porque como ya hemos dicho, el tráfico y sus ingresos asociados no están generados por clientes propios del operador en cuestión.

Dada la complejidad de manejar variables económicas, comerciales y sociales, es muy recomendable enfocar la caracterización del tráfico de terminación de voz desde una perspectiva diferente, de forma que las variables a manejar sean sencillas y fáciles de obtener, en la medida de lo posible. En este sentido, la primera acción a realizar es la inspección directa de los datos disponibles, lo cual nos conduce de manera inmediata al análisis temporal del tráfico de terminación.

Como hemos visto en las figuras 3.1 y 3.3, la evolución del tráfico de terminación de voz en España es muy estable, de forma que las variaciones temporales a medio y largo plazo son muy lentas, siguiendo una tendencia definida. Esta tendencia puede entenderse como la primera característica temporal del tráfico de terminación de voz, y por lo tanto es susceptible de ser considerada a la hora de realizar cualquier tarea de estimación del tráfico, lo cual es uno de los ejes del presente proyecto.

Por otra parte, tanto en los estudios de Heegaard [Hee07], como en otros estudios llevados a cabo por la ITU-T [16], [17], se indica que el tráfico telefónico tiene comportamiento estacional y fuertemente periódico. En este sentido, el tráfico de terminación de voz deberá mantener esas características de estacionalidad y periodicidad, ya que es un subconjunto del tráfico móvil y las situaciones particulares que pueden diferenciarlo no tienen peso suficiente como para eliminar o modificar estas características.

La estacionalidad del tráfico está muy marcada por el comportamiento de la actividad comercial. Esta circunstancia queda de manifiesto al constatar el incremento del tráfico móvil en los meses de junio, julio y diciembre, en los que la actividad comercial crece y para los que los grandes operadores móviles lanzan campañas comerciales específicas (que en el sector se denominan “campaña de verano” y “campaña de Navidad”). De forma equivalente, el tráfico móvil se reduce en los meses de enero y agosto (efectos “cuesta de enero” y “cerrado por vacaciones” respectivamente).

Para comentar el carácter periódico del tráfico de terminación utilizaremos un ejemplo, en el que mostramos el patrón de tráfico móvil de voz generado por un conjunto reducido de estaciones base del operador noruego NETCOM durante el mes de septiembre de 2005 [Hee07]. El resultado se muestra en la figura 3.4, donde tenemos el perfil de tráfico medio de una semana, en el que los datos se contabilizaron de hora en hora, acumulando el tráfico cursado en la misma hora del mismo día de semanas diferentes y normalizando el resultado. Tanto la normalización como la indefinición del número de estaciones base monitorizadas en la medida surge por la necesidad de mantener la confidencialidad del volumen de tráfico de NETCOM. Es necesario aclarar que en este ejemplo se considera tráfico móvil general, pero como ya hemos dicho, el tráfico de terminación de voz mantendrá las mismas características.

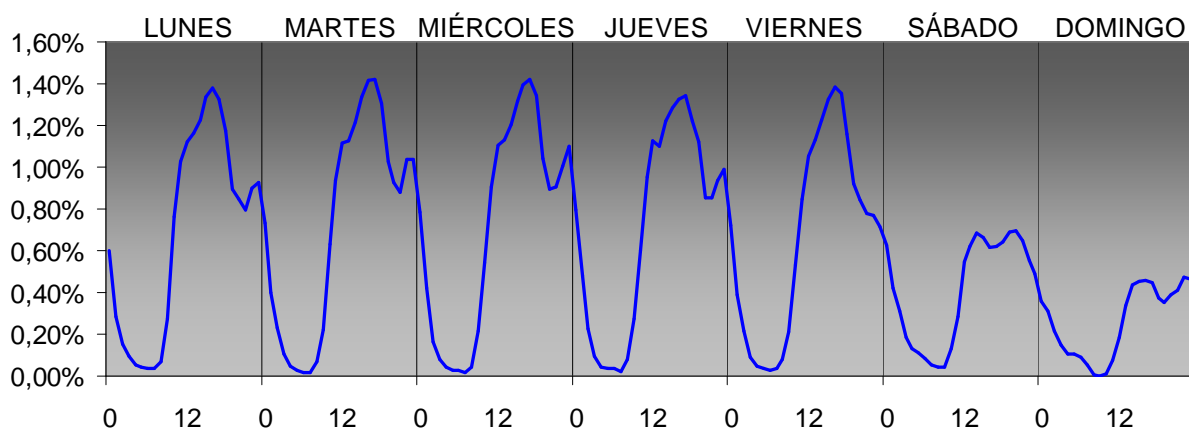


Figura 3.4 Muestra ejemplo de la evolución del tráfico móvil a lo largo de una semana
[Hee07]

De la figura anterior se puede extraer información muy útil. En primer lugar se observa que el volumen de tráfico es muy reducido durante cualquier noche de la semana, lo cual era esperable. En segundo lugar se observa que el perfil de tráfico de los días laborables es muy similar entre sí, y en tercer lugar queda reflejado cómo el tráfico cae fuertemente los sábados y aún más los domingos. Además, este comportamiento se mantiene semana a semana, de forma que el perfil de tráfico de un operador dado en un día concreto de la semana será muy similar al mismo día de la semana anterior o de la siguiente, con la salvedad de los días festivos, que se comportan de manera similar a los domingos. Este comportamiento fuertemente periódico respecto de la hora del día y del día de la semana demuestra que los perfiles de actividad social y económica influyen de forma decisiva en el uso del servicio de telefonía móvil.

Cabe indicar que el patrón de tráfico obtenido de la muestra de NETCOM podría diferir del patrón que se habría podido obtener de una muestra de tráfico de un operador español, ya que en ambos países los hábitos sociales son ligeramente diferentes (como la hora de almuerzo o cena). Sin embargo, estas diferencias no serán grandes, ya que como indica Heegaard en su estudio, la independencia de la localización del usuario para la utilización del teléfono móvil hace que el patrón de uso se vea menos influenciado por estos condicionantes sociales que otros servicios de comunicaciones, como son la telefonía fija o la telefonía IP. En cualquier caso, las posibles diferencias no eliminarían el carácter periódico, sino que le impondrían ligeras modificaciones.

Como hemos visto, las variables económicas, sociales y comerciales se traducen en fenómenos de periodicidad, estacionalidad y tendencia, que son representados de forma natural y directa por medio de variables temporales. Estas variables son sencillas, fáciles de manejar y de obtención inmediata, por lo que son muy adecuadas para la predicción de tráfico de terminación de voz.

Teniendo en cuenta estas premisas, se ha seleccionado un conjunto de 5 variables, en el que cada una de ellas aporta información relevante para la caracterización del tráfico de terminación de voz. Así, el sistema de predicción diseñado se basa en el empleo de muestras etiquetadas de tráfico, donde cada muestra consiste en el valor de tráfico cursado por el operador bajo estudio en

función de los valores tomados por estas variables. Las seleccionadas son las siguientes:

- Fecha: es la fecha en que se obtuvo el valor de tráfico de la muestra. Aporta información sobre la tendencia.
- Día de la semana: es el día de la semana en que se obtuvo el valor de tráfico de la muestra. Aporta información sobre la periodicidad en los días laborables y los comportamientos particulares de los sábados y domingos.
- Festivo: Considera si el día en que se obtuvo el valor de tráfico de la muestra era festivo y el ámbito de dicha festividad (nacional, autonómica o local).
- Día del año: es el día del año en que se obtuvo el valor de tráfico de la muestra. Aporta información sobre la estacionalidad y excepciones (festivos, días de pico de tráfico, p. e. Nochebuena).
- Semana: es la semana del año en que se obtuvo el valor de tráfico de la muestra. Aporta información sobre la estacionalidad.

La cuantificación de cada una de estas variables se explicará en el capítulo 5 del presente documento, cuando exponamos el detalle de la implementación de la solución adoptada. En ese capítulo también se demostrará que este conjunto de variables aporta suficiente capacidad expresiva al sistema de predicción, manteniendo la complejidad y el coste computacional en límites razonables.

3.2. MARCO REGULATORIO Y NORMATIVA ESPECÍFICA

Uno de los puntos clave de este proyecto es el diseño de un mecanismo de cálculo y optimización de las tarifas nominales de terminación de voz, de forma que se consiga maximizar los ingresos de un operador móvil por este concepto. La optimización surge porque los operadores móviles han podido seleccionar el valor de estas tarifas, pero conforme a una serie de restricciones impuestas por la CMT. Si los operadores pudiesen fijar libremente las tarifas nominales de terminación en su red, se darían situaciones de desequilibrio en el mercado

mayorista que se trasladarían directamente al minorista, ya que los operadores se ven en la necesidad de repercutir sus costes en las tarifas a cliente final. De hecho, tradicionalmente los precios a cliente final de las llamadas dentro de la propia red de un operador móvil son más baratos para el usuario que los precios de las llamadas hacia usuarios de otros operadores. Con este precedente, si no se planteasen restricciones, los operadores con mayor cuota de mercado podrían establecer estrategias comerciales que se valiesen del incremento de sus tarifas nominales de terminación para afianzar su base de clientes e inclusive aumentarla, al imponer una barrera comercial para los clientes del resto de operadores.

Así pues, el objetivo de la regulación asociada al servicio de terminación de voz es definir el escenario técnico y de negocio en que este servicio se produce, para garantizar su viabilidad y salvaguardar los intereses de los usuarios finales y de los operadores en un entorno de competencia entre estos últimos.

Por tanto, el conocimiento exhaustivo del marco regulatorio y la normativa específica es imprescindible para el cálculo de las tarifas nominales de terminación de voz por parte de los operadores móviles. Cabe destacar que el control regulatorio se ha ido implantando por parte de la CMT de forma progresiva, atendiendo a las acciones provenientes de la Comisión Europea, los conflictos interpuestos por los operadores y las reclamaciones surgidas de las organizaciones de consumidores.

En los siguientes puntos ahondaremos en los requerimientos y restricciones que los operadores han tenido que satisfacer a la hora de fijar las tarifas.

3.2.1. Declaración de dominancia de los operadores móviles.

Contabilidad de costes

Tal como adelantamos en el capítulo 2, la acción reguladora de la CMT sobre las tarifas de terminación de voz en redes móviles comenzó con la declaración de dominancia de los operadores móviles en el mercado de interconexión (operadores con poder significativo en el mercado u operadores PSM). Según aparece en la antigua Ley General de Telecomunicaciones

11/1998 [18], un operador era considerado dominante cuando disfrutaba de una cuota del mercado correspondiente superior al 25%, midiendo esta cuota en ingresos brutos globales generados por la utilización de las redes o por la prestación de los servicios. Sin embargo, la propia Ley permitía a la CMT declarar a un operador con posición dominante aun cuando no alcanzase ese 25%, o excluir de tal declaración a un operador aun cuando superase la cuota indicada, siempre y cuando se produjese una situación que pudiese afectar a las condiciones de competencia. Esta circunstancia hizo que MOVISTAR fuese declarado dominante en el mercado de interconexión en julio del 2000 [20], mientras que VODAFONE (AIRTEL) lo fue en octubre de 2001 [21], ORANGE (AMENA) en septiembre de 2003 [22] y YOIGO en octubre de 2007 [6], pese a que estos últimos no alcanzaban la cuota en el momento de su declaración. La dominancia conlleva una serie de obligaciones que los operadores móviles deben cumplir con la CMT y con el resto de operadores [19]:

1. Facilitar la interconexión en condiciones no discriminatorias, transparentes y fundadas en criterios objetivos.
2. Presentación de cuentas separadas de los servicios de interconexión y de los otros servicios prestados por el operador.
3. Precios transparentes y orientados a costes. Aplicación de un sistema adecuado de contabilidad de costes.

De la primera obligación se deduce que las tarifas nominales de terminación de voz deben ser las mismas para todos los operadores con los que se alcance un Acuerdo General de Interconexión (AGI). Además, el operador móvil no debe negarse a la negociación de este tipo de acuerdo con ningún otro operador; sin embargo, no existe obligación de rubricar dicho acuerdo con todos los operadores que así lo requieran, ya que por ejemplo, el establecimiento de la interconexión directa implica unos costes que no estarán justificados si el volumen de tráfico esperado entre los operadores es pequeño.

La segunda obligación está encaminada a garantizar la transparencia en la gestión y facturación de los diferentes servicios de interconexión. Esto proporciona a la CMT los mecanismos necesarios para inspeccionar y controlar cada servicio de forma independiente, facilitando la aplicación de la regulación específica para cada uno. Evidentemente, los ingresos y costes asociados al

servicio de terminación de voz deben aparecer desglosados en la información presentada por cada operador.

La tercera obligación es la de mayor alcance. Surge por lo establecido en la antigua Ley General de Telecomunicaciones 11/1998 [18] y rubricado por la Ley General de Telecomunicaciones 32/2003 [19] que derogó a la anterior. En estas Leyes se establecía que los operadores dominantes deben atenerse a los principios de transparencia y de orientación a costes, en la determinación de los precios de interconexión. Además, se establecía que los precios de interconexión se deben determinar en función del coste real de su prestación, entendiendo que dicho coste coincide con el coste de prestación eficiente a largo plazo, incluyendo una remuneración razonable de la inversión, mediante el uso de una planta de dimensiones óptimas, valorada a coste de reposición, con la mejor tecnología disponible y en la hipótesis de mantenimiento de la calidad del servicio. De otra forma, esto quiere decir que los precios de interconexión, y en particular el precio de terminación de voz, deben estar fijados según los costes reales derivados del correcto establecimiento, gestión y mantenimiento de la interconexión de las redes. En este contexto, el sistema de contabilidad de costes posibilita que la CMT pueda evaluar si los precios propuestos por un determinado operador están orientados a sus costes.

Las Leyes también contemplan el caso en que un operador dominante no acredite que sus precios están orientados a costes. Si se produce esta circunstancia, la CMT tiene potestad para emprender acciones que den como resultado la modificación de las tarifas. Cabe indicar que la CMT aún no había aprobado los sistemas de contabilidad de costes de estos operadores cuando redujo por primera vez sus tarifas, pero actuó de forma cautelar teniendo en consideración el precio medio de terminación europeo (calculado a partir de las tarifas de los operadores móviles de la Unión Europea) y al evaluar los datos de costes proporcionados por los propios operadores. En cualquier caso, los datos los operadores fueron verificados por una auditoria externa antes de ejecutar la reducción de las tarifas.

El primer operador móvil en presentar un sistema de contabilidad de costes fue MOVISTAR. Este sistema fue aprobado por parte de la CMT en diciembre de 2001 [23]. En ese sistema se describía de manera clara e intuitiva

todas las fases del proceso que, a partir de los datos de la contabilidad financiera y de los costes de capital calculados conforme a las inversiones realizadas y la tasa de retorno, permitían calcular márgenes por servicios.

Los sistemas de contabilidad de costes aprobados para VODAFONE en mayo de 2002 [24] y para ORANGE en diciembre de 2004 [25] tienen esquemas similares al aprobado para MOVISTAR. De momento, estos son los tres únicos operadores móviles que han presentado un sistema de contabilidad de costes, debido a su condición de operadores PSM en el mercado de interconexión. Para YOIGO, la presentación del sistema de contabilidad de costes está aún pendiente. De cualquier forma, si algún otro operador alcanzase peso significativo en este mercado o en el mercado de telefonía móvil, se vería sujeto a las mismas obligaciones sobre contabilidad de costes.

Cabe indicar que los sistemas de contabilidad de costes son dinámicos, ya que la CMT tiene la obligación de revisar de forma anual los fundamentos y elementos que los integran, proponiendo modificaciones si lo considera oportuno.

3.2.2. Esquemas de tarificación del servicio de terminación

Para poder comprender el detalle del procedimiento de orientación a costes, es necesario exponer los diferentes esquemas de tarificación que han venido utilizando los operadores móviles para el servicio de terminación de voz. Los describimos a continuación.

- Esquema de tarificación básico. Consideramos un esquema básico a aquel en que la tarificación se realiza exclusivamente en base a un conjunto de tarifas unitarias, donde una tarifa unitaria es la relación entre un importe y una unidad de tiempo. En general las tarifas se expresan en Euros por minuto, si bien en España la tarificación se realiza por segundos (con la excepción de las franquicias). Cada tarifa unitaria se corresponde con un intervalo de tiempo o franja horaria, no pudiendo existir solapamiento entre franjas. Las franjas pueden definirse en función del tipo de día (laborable, Sábado, Domingo, Festivo, etc.) o la hora del día, y suelen ser elegidas en función de la concentración del tráfico a lo largo de la semana, asociando una tarifa mayor a las franjas

en que se genera una mayor concentración de tráfico. En caso de que una llamada se inicie en una franja y termine en otra, se cambia la tarifa al cambiar de franja, aplicando por tanto dos tarifas a una sola llamada.

A modo de ejemplo presentamos a continuación el esquema de tarificación básico utilizado por MOVISTAR para el servicio de terminación en su red en el periodo comprendido entre el 16 de abril y el 15 de octubre de 2007 [27]:

- Horario Único: 0,103100 euros/minuto efectuándose el cómputo en segundos desde el primer segundo de conversación.

En este ejemplo sólo había una franja horaria. Así, cualquier llamada recibida en la red de MOVISTAR en el periodo indicado se facturó a 0,001718333 € por segundo, correspondientes a la tarifa de 0,103100 €/minuto, para cualquier día de la semana y hora del día.

- Esquema de tarificación con establecimiento de llamada. La única diferencia entre este esquema y el básico es la aparición de un importe fijo a facturar por cada llamada, independientemente de la duración de la misma. Este importe se denomina establecimiento de llamada, y se aplica de forma adicional a la tarifa correspondiente a la franja horaria en que se realice la llamada.

A modo de ejemplo presentamos el esquema de tarificación con establecimiento de llamada empleado por VODAFONE para el servicio de terminación en su red en el periodo comprendido entre el 16 de octubre de 2006 y el 15 de abril de 2007 [28]:

- Horario Normal (de lunes a viernes, de ocho a veinte horas): 0,04 euros/llamada, en concepto de establecimiento, más 0,097255 euros/minuto efectuándose el cómputo en segundos desde el primer segundo de conversación.

- Horario Reducido (de lunes a viernes, de veinte a ocho horas; sábados, domingos y festivos de ámbito nacional, durante todo el día): 0,04 euros/llamada, en concepto de establecimiento, más 0,085601 euros/minuto efectuándose el cómputo en segundos desde el primer segundo de conversación.

En este caso vemos que VODAFONE aplicó dos franjas, por lo que la tarificación de una llamada dependía del día y hora en que se cursó. La primera franja se denominó como *horario normal*, debido a que se corresponde con el periodo de tiempo en que se produce una mayor concentración de tráfico, mientras que la segunda franja se denominó como *horario reducido*, debido a que comprendía un intervalo de tiempo en que el volumen de tráfico era menor.

- Esquema de tarificación con periodo de franquicia. Este caso se diferencia del esquema básico en la existencia del periodo de franquicia, que es un intervalo de tiempo al comienzo de la llamada durante el que el precio de la llamada no varía. Esto significa que todas las llamadas de duración menor o igual al periodo de franquicia se facturan con el mismo importe, independientemente de la duración concreta de cada llamada. En todas las ocasiones en que se ha empleado este esquema de tarificación en España para el servicio de terminación de voz, el periodo de franquicia ha sido de 60 segundos, con un importe igual al valor de la tarifa nominal. Una vez terminada la franquicia, la tarificación se realiza por segundos, al igual que en los dos esquemas anteriores. Si se produjese un cambio de franja antes de finalizar el periodo de franquicia, se esperará al término de dicho periodo para aplicar la nueva tarifa.

Como ejemplo presentamos el esquema de tarificación con franquicia empleado por ORANGE para la terminación en su red entre el 16 de octubre de 2006 y el 15 de abril de 2007 [28]:

- *Horario Normal (de lunes a viernes, de ocho a veintidós horas y sábados de ocho a catorce horas): 0,122870 euros/minuto facturándose un minuto de conversación completo para duraciones iguales o inferiores al minuto y efectuándose el cómputo por segundos para duraciones superiores.*

- *Horario Reducido (de lunes a viernes, de veintidós a ocho horas; sábados de cero a ocho horas y de catorce a veinticuatro horas; domingos y festivos de ámbito nacional, durante todo el día): 0,070000 euros/minuto facturándose un minuto de conversación completo para*

duraciones iguales o inferiores al minuto y efectuándose el cómputo por segundos para duraciones superiores.

En este caso vemos que ORANGE aplicó dos franjas, por lo que tarificación dependía del día, la hora en que se cursó la llamada y la duración de la misma. Además se observa que los periodos de tiempo asociados al *horario normal* y al *horario reducido* son distintos a los usados por VODAFONE en el ejemplo anterior, si bien siguen representando la concentración del tráfico a lo largo de la semana.

3.2.3. Orientación a costes. Determinación del precio medio y ajuste de tarifas nominales

Los sistemas de contabilidad de costes proporcionan a la CMT la información necesaria para evaluar los costes reales de la prestación del servicio de terminación. Ahora bien, la CMT necesitaba disponer de un método objetivo para comprobar si las tarifas nominales de terminación de un operador estaban orientadas a estos costes, teniendo en cuenta que estas tarifas pueden adoptar diferentes esquemas. Esto último se desprende de lo indicado en la Orden Ministerial de 18 de mayo de 1998 [26], donde se establece que *no cabe exigir a los operadores de servicios telefónicos con tarifas referidas a las de otros operadores, la adopción de idénticos sistemas tarifarios, ya que tal exigencia supondría una seria limitación a la posibilidad de diversificar la oferta, en perjuicio de la capacidad de elección de los usuarios.*

En este punto explicaremos el procedimiento empleado por la CMT para la orientación de las tarifas nominales de terminación a los costes del servicio. Podemos considerar que este procedimiento está formado por los siguientes tres pasos:

1. Evaluación de costes.
2. Cálculo del precio medio.
3. Ajuste de las tarifas nominales de terminación.

En las siguientes páginas describiremos en detalle cada uno de estos tres pasos del procedimiento.

1. Evaluación de costes

Para evaluar los costes resultantes del análisis de la contabilidad de los operadores PSM, la CMT ha empleado el denominado *coste medio de terminación*, CM, que consiste en la relación entre el total de los costes imputados al servicio de terminación y el total de minutos de terminación generados hacia las redes de otros operadores, en un periodo dado. Se expresa en euros por minuto y contempla todos los costes asociados al servicio, incluyendo los debidos al tráfico hacia otras redes o los surgidos del mantenimiento de todas las infraestructuras de interconexión.

2. Cálculo del precio medio

Para evaluar las tarifas nominales se necesita un parámetro equivalente al coste medio. Este parámetro se denomina *precio medio*, PM, y se calcula a partir de las tarifas nominales. Establece un límite superior para el valor de estas tarifas, de forma que si el PM calculado supera un determinado valor máximo, entonces procede modificarlas. Este valor límite superior del precio medio se denomina precio medio máximo, PM_{MAX} . El planteamiento general de la CMT a la hora de establecer el valor del PM_{MAX} ha sido asignarle el valor del coste medio, CM, más un cierto margen.

Podría pensarse en obtener el PM como la relación entre el total de ingresos provenientes del tráfico de terminación y el total de minutos recibidos. Sin embargo, la CMT no ha usado este parámetro, debido fundamentalmente a la existencia de una legislación específica al respecto. En concreto, en la Orden Ministerial de 18 de mayo de 1998 [26] se establece la formulación precisa para la evaluación de las tarifas aplicables al tráfico entre operadores, para cualquier esquema de tarificación. El resultado es la tarifa típica, TT, cuya expresión es la siguiente:

$$TT = C_0 + C_P \frac{e^{(-T_0/T_M)}}{1 - e^{(-T_P/T_M)}} \quad (3.1)$$

- C_0 : Coste por establecimiento de llamada expresado en euros.
- T_0 : Segundos no cobrados tras el establecimiento de llamada.
- C_P : Coste de la unidad de tarificación en euros por segundo.

- T_P : Duración de la unidad de tarificación expresada en segundos
- T_M : Duración media de la llamada, en segundos por llamada.

La tarifa típica es un indicador agregado que mide el precio medio para cada franja horaria, en euros por llamada, de un conjunto de llamadas cuya tarifa incluye un periodo de franquicia. El significado de los diferentes elementos incluidos en la formulación se puede explicar por medio de la siguiente figura:

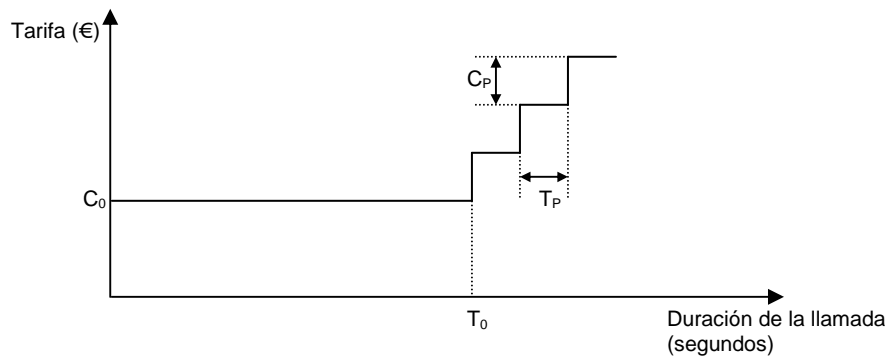


Figura 3.5 Descripción gráfica de la tarifa típica

Como se puede observar, el término T_0 representa la duración del periodo de franquicia y C_0 es el importe asociado a dicha franquicia. C_P es la tarifa expresada en euros por segundo y el parámetro T_P siempre es 1 segundo, ya que en España se tarifica por segundos. Por otra parte, el valor de la duración media de la llamada, T_M , es variable, habiendo sido asignado de forma directa por parte de la CMT, o bien calculado a partir de datos reales de tráfico.

La relación de la tarifa típica con la duración media de la llamada nos da una primera expresión del precio medio. Si además multiplicamos esa relación por los 60 segundos que hay en un minuto, tenemos ya el precio medio expresado en Euros por minuto:

$$PM = 60 TT / T_M \quad (3.2)$$

Sin embargo, el parámetro así calculado proporcionaría únicamente el precio medio para una única franja horaria. Por lo tanto es necesario operar con las expresiones anteriores para incluir diferentes franjas horarias. Para esto, la CMT desarrolló dos procedimientos distintos, si bien uno está derivado

del otro. Nos referiremos al primer procedimiento como *método de cálculo del precio medio sin ponderadores de tráfico* y al segundo como *método de cálculo del precio medio con ponderadores de tráfico*. Ambos permiten obtener el valor del precio medio a partir de las tarifas nominales.

- Cálculo del precio medio sin ponderadores de tráfico. El primer paso consiste en expresar el PM en términos de la tarifa típica para cada franja. Para ello, se emplean dos coeficientes reales positivos que proporcionan la relación del volumen de tráfico entre las franjas normal y reducida. Denominamos a estos coeficientes H_N y H_R respectivamente, y son tales que cumplen la relación $H_N + H_R = 1$. Por otra parte, si expresamos la tarifa típica en franja normal como TT_N y en franja reducida como TT_R , podemos representar el precio medio a partir de la siguiente expresión:

$$PM = 60 \frac{TT_N}{T_M} H_N + 60 \frac{TT_R}{T_M} H_R \quad (3.3)$$

Donde:

$$TT_N = C_{0N} + C_{PN} \frac{e^{(-T_0/T_M)}}{1 - e^{(-T_P/T_M)}} \quad (3.4)$$

$$TT_R = C_{0R} + C_{PR} \frac{e^{(-T_0/T_M)}}{1 - e^{(-T_P/T_M)}} \quad (3.5)$$

Dado que éste método sólo fue aplicado en esquemas de tarificación con periodo de franquicia, podemos asumir que los términos C_{0N} y C_{PN} por un lado y C_{0R} y C_{PR} por otro representan el importe de la franquicia y la tarifa nominal para las franjas normal y reducida respectivamente, donde cada tarifa nominal se expresa en Euros por segundo. Teniendo en cuenta que el importe de la franquicia coincide con el valor de la tarifa nominal expresada en Euros por minuto, podemos expresar estos parámetros de forma conjunta por medio de las tarifas nominales en franjas normal y reducida, denominándolas T_{HN} y T_{HR} respectivamente:

$$T_{HN} = C_{0N} = 60C_{PN} \quad (3.6)$$

$$T_{HR} = C_{0R} = 60C_{PR} \quad (3.7)$$

Sustituyendo las expresiones de T_{HN} y T_{HR} en las de TT_N y TT_H , y a su vez estas en la expresión del precio medio, tenemos que:

$$PM = 60 \frac{H_N}{T_M} \left[T_{HN} + \frac{T_{HN}}{60} \frac{e^{(-T_0/T_M)}}{1 - e^{(-T_P/T_M)}} \right] + 60 \frac{H_R}{T_M} \left[T_{HR} + \frac{T_{HR}}{60} \frac{e^{(-T_0/T_M)}}{1 - e^{(-T_P/T_M)}} \right]$$

Agrupando términos y llamando E a la relación exponencial tenemos:

$$PM = \frac{60 + E}{T_M} [H_N T_{HN} + H_R T_{HR}] \quad (3.8)$$

$$\text{Donde } E = \frac{e^{(-T_0/T_M)}}{1 - e^{(-T_P/T_M)}}$$

En estas expresiones, la CMT asignó al parámetro T_M el valor fijo de 100 segundos por llamada, apoyándose en la Orden ministerial de 18 de mayo de 1998 [26], en la que se indicaba como valor típico para llamadas de fijo a móvil y de móvil a móvil. Por otra parte, los valores de H_N y H_R variaron en función de los datos de tráfico de cada operador evaluados en el momento de asignar las tarifas. Por ejemplo, en las resoluciones de octubre de 2003 [29] se fijó un precio medio máximo de 0,1614 €/min para MOVISTAR y VODAFONE, empleando $H_N = 0,59$ y $H_R = 0,41$. Las tarifas asignadas fueron:

- *Horario Normal* (de lunes a viernes, de ocho a veinte horas): 0,159802 euros/minuto, facturándose un minuto de conversación completo para duraciones iguales o inferiores al minuto y efectuándose el cómputo en segundos para duraciones superiores.

- *Horario Reducido* (de lunes a viernes, de veinte a ocho horas; sábados, domingos y festivos de ámbito nacional, durante todo el día): 0,088007 euros/minuto, facturándose un minuto de conversación completo para duraciones iguales o inferiores al minuto y efectuándose el cómputo en segundos para duraciones superiores.

En efecto, si en la expresión (3.8) se emplea $T_{HN} = 0,159802$ €/min, $T_{HR} = 0,088007$ €/min, $H_N = 0,59$ y $H_R = 0,41$, se obtiene un precio medio de $PM = 0,1614$ €/min.

Este método presentaba dos problemas fundamentales. El primero era la imposibilidad de flexibilizar las franjas horarias, debido a que la relación del volumen de tráfico entre franja normal y reducida era considerada un parámetro constante a la hora de calcular el PM. Esto impedía que los operadores pudiesen elegir libremente si esquema de tarificación, conforme a lo indicado en la Orden Ministerial de 18 de mayo de 1998 [26]. El segundo problema era la falta de precisión cometida al considerar que la duración media de la llamada era constante y de valor $T_M = 100$ segundos.

- Cálculo del precio medio con ponderadores de tráfico. Este método permite calcular el PM incorporando información de la duración media de la llamada obtenida a partir de tráfico real y permitiendo cierta flexibilidad en la asignación de las franjas horarias. Se desarrolló por la CMT con el objeto de mitigar las deficiencias presentadas por el método anterior. En octubre de 2003 [29], antes de aplicar por primera vez este método, la CMT solicitó a MOVISTAR, VODAFONE y ORANGE la información de partida para aplicarlo. Esta información consistió en el número de llamadas y el número de minutos de tráfico de terminación de voz recibido en un año (de octubre de 2002 a septiembre de 2003), desglosado por operador interconectado y dividido en cinco intervalos de tiempo:

- Intervalo I_1 : Lunes a Viernes de 8:00 a 20:00 horas
- Intervalo I_2 : Lunes a Viernes de 20:00 a 21:00 horas
- Intervalo I_3 : Lunes a Viernes de 21:00 a 22:00 horas
- Intervalo I_4 : Sábados de 8:00 a 14:00 horas
- Intervalo I_5 : Resto del tiempo

El desglose por operador interconectado consideró cuatro grupos, y fue equivalente para los tres operadores. Un primer grupo debía incluir el tráfico procedente de Telefónica de España S.A.U., el segundo y tercer grupo debían incluir el tráfico procedente de los otros dos operadores móviles y el cuarto grupo debía incluir el tráfico procedente del resto de operadores.

Una vez descrita la información necesaria, podemos pasar a describir el procedimiento de cálculo del precio medio.

El primer paso consiste en calcular la duración media de las llamadas para cada intervalo y operador interconectado. Denominaremos a estas duraciones medias como T_{MIJ} , donde el subíndice I hace referencia a cada uno de los cinco intervalos ($I = 1, \dots, 5$) y el subíndice J hace referencia a cada uno de los cuatro grupos de operadores interconectados ($J = 1, \dots, 4$).

El segundo paso consiste en calcular el precio medio según la expresión de la tarifa típica, para cada operador e intervalo, aplicando la duración T_{MIJ} calculada. Esto da lugar a veinte precios medios que denominaremos PM_{IJ} , y que se pueden expresar como:

$$PM_{IJ} = 60 \frac{H_{IJ}}{T_{MIJ}} \left[T_I + \frac{T_I}{60} \frac{e^{(-T_0/T_{MIJ})}}{1 - e^{(-T_P/T_{MIJ})}} \right] \quad (3.9)$$

En esta expresión, el término T_I representa el valor de la tarifa nominal para el intervalo I, mientras que el término H_{IJ} es un *ponderador* que indica la porción de tráfico procedente del operador J en el intervalo I. Este ponderador se expresa en tanto por 1 y toma como referencia el total de minutos recibidos del operador J.

El siguiente paso es calcular el precio medio del tráfico recibido del operador J, que denominaremos PM_J . Para esto, no hay más que sumar los precios medios de cada intervalo obtenidos para el operador J, esto es:

$$PM_J = \sum_I PM_{IJ} \quad (3.10)$$

Por último, el precio medio, PM, se obtiene como la suma ponderada de los precios medios obtenidos del tráfico procedente de todos los operadores. Cada uno de los cuatro precios medios se multiplica por un *ponderador* K_J , que representa en tanto por 1 la porción de tráfico procedente del operador J respecto del total del tráfico recibido. Lo expresamos así:

$$PM = \sum_J PM_J \cdot K_J \quad (3.11)$$

El hecho de disponer de 5 intervalos permitía flexibilizar las tarifas, ya que los intervalos I_2 , I_3 e I_4 podían ser incluidos en la franja normal o en la franja reducida. Como se puede suponer, el intervalo I_1 se planteó como la base de la franja normal y el I_5 de la franja reducida. Cabe indicar que aunque el procedimiento podía considerar hasta 5 franjas con esta información de partida, la CMT lo enfocó al uso de dos franjas [29], si bien tanto MOVISTAR como VODAFONE han empleado la franja única en varias ocasiones.

3. Ajuste de las tarifas nominales

El ajuste de las tarifas nominales se ha llevado a cabo de dos formas diferentes. Inicialmente, la CMT las modificó directamente, tal como ocurrió en Julio de 2002 para MOVISTAR y VODAFONE [30], y en octubre de 2003 para los dos anteriores y ORANGE [29]. En estos casos, los precios medios impuestos por la CMT se obtuvieron a través del método de cálculo sin ponderadores de tráfico.

En las siguientes resoluciones, la CMT se limitó a fijar un precio medio máximo orientado a los costes de prestación del servicio de terminación para cada operador móvil PSM, con un periodo de validez determinado. De esta forma, desde enero de 2004 hasta octubre de 2009, los operadores han tenido libertad para proponer sus propias tarifas de terminación de voz, con la única restricción de tener que respetar el precio medio máximo impuesto por la CMT, calculado según el método de ponderadores de tráfico [5], [6], [31], [32], [33]. Así, el objetivo de cualquier operador ha sido fijar unas tarifas tales que, cumpliendo la restricción del precio medio, maximicen los ingresos por el tráfico de terminación en su red. Por último, cabe indicar que MOVISTAR, VODAFONE y ORANGE han sufrido un total de ocho bajadas de las tarifas, donde las seis últimas estaban ya recogidas en el procedimiento de reducción progresiva llamado *glide-path*, que ya describimos en el capítulo 2. Por su parte, YOIGO ha sufrido cuatro.

3.3. CASO DE NEGOCIO

En este punto disponemos ya de todos los elementos necesarios para concretar el objetivo principal del proyecto, que es la maximización de los ingresos de un operador móvil por la prestación del servicio mayorista de terminación de voz a otros operadores. En el primer apartado analizábamos la naturaleza del tráfico de terminación de voz, destacando las propiedades de estacionalidad, periodicidad, y tendencia. Tal como se verá, estas cualidades permiten plantear el diseño del sistema de predicción del tráfico de terminación de voz. Por otra parte, en el segundo apartado se ha expuesto la regulación referente a las tarifas nominales de terminación, donde la restricción dada por el precio medio máximo plantea el escenario de optimización de estas tarifas.

Entre las actividades a realizar en un operador móvil, la predicción del tráfico de terminación puede tener aplicaciones muy distintas y a diferente nivel, tales como pueden ser la elaboración de presupuestos, el dimensionado de elementos de red, etc. En nuestro caso, es también un paso obligatorio en el cálculo y optimización de las tarifas nominales, ya que para evaluar los ingresos que se obtendrían con unas tarifas dadas hay que predecir el tráfico que existiría en el periodo de vigencia de las mismas. Teniendo en cuenta que el objetivo final de la optimización es la maximización de los ingresos de un operador móvil por la prestación del servicio mayorista de terminación de voz, podemos considerar que predicción y optimización son objetivos parciales de un proceso, que se puede describir por medio de las siguientes acciones:

1. Predecir el tráfico de terminación que recibirá el operador en el periodo bajo estudio. Ese periodo de tiempo viene dado por la vigencia del precio medio máximo impuesto por la CMT, que es de seis meses según el procedimiento de bajadas progresivas, *glide-path*. La predicción debe permitir distinguir entre los cinco intervalos de tiempo que ha contemplado la CMT, de forma que se tenga la máxima libertad a la hora de seleccionar las franjas horarias.
2. Obtener la expresión del precio medio, PM, en función de los valores de las tarifas nominales. Se deben evaluar todos los esquemas de

tarificación y todos los horarios posibles para las franjas. Para los esquemas con periodo de franquicia se debe utilizar el método de cálculo con ponderadores de tráfico. Las duraciones medias y ponderadores de tráfico por operador se deben calcular a partir de datos de tráfico previos correspondientes a un periodo prefijado.

3. Hacer una búsqueda de los valores de las tarifas nominales que maximicen los ingresos que se obtendrían al aplicarlas sobre el tráfico predicho en el punto 1. Esta búsqueda estará limitada por el valor del precio medio máximo vigente para el periodo bajo estudio, que se debe comprobar aplicando las tarifas sobre la expresión obtenida en el punto 2.

En la siguiente figura se representan las relaciones del objetivo final con los objetivos parciales y las limitaciones a las que están sujetos.

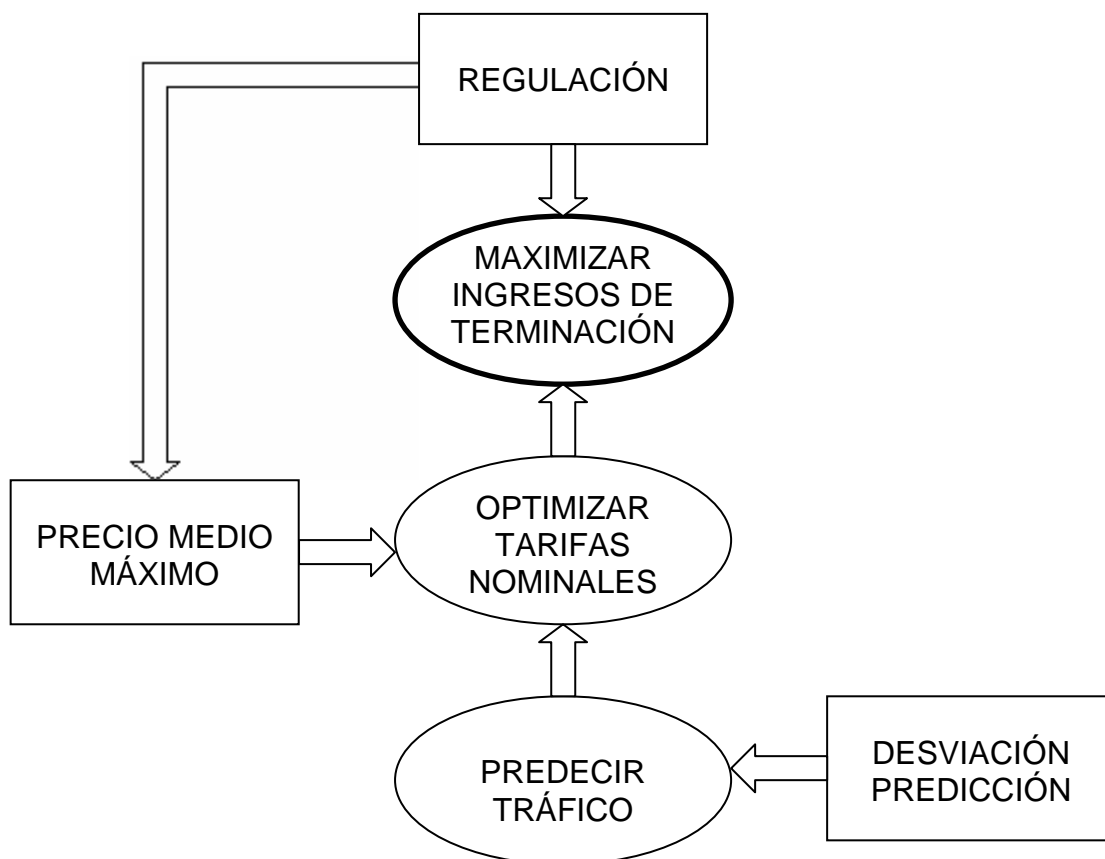


Figura 3.6 Objetivos y limitaciones en el procedimiento de maximización de ingresos de terminación

El objetivo final se consigue optimizando las tarifas nominales, para lo que es necesario predecir el tráfico de terminación. La predicción está limitada por las desviaciones respecto del tráfico que finalmente se produzca, mientras que el valor de las tarifas está limitado por el precio medio máximo. En conjunto, el procedimiento de maximización de ingresos de terminación de voz está limitado por la regulación vigente.

Tal como adelantamos al inicio del presente capítulo, para ilustrar el procedimiento de maximización de ingresos expuesto, hemos creado un operador móvil ficticio y le hemos situado en el contexto regulatorio apropiado. A continuación describiremos y valoraremos las características más relevantes del negocio de terminación de voz de nuestro operador.

3.3.1. Descripción general

Podemos empezar diciendo el nombre dado a nuestro operador ficticio. Esta denominación es UC3MOVIL, y la utilizaremos en lo sucesivo. Conforme a lo visto en los apartados anteriores, nuestro operador debía ser considerado con poder significativo en el mercado de interconexión para que sus tarifas de terminación estuviesen sujetas a la regulación indicada. Como ya adelantamos en el capítulo 2, esta circunstancia se produce ya para cualquier operador móvil virtual con red propia, por lo que ha bastado considerar que UC3MOVIL es un operador de este tipo. Bajo esta circunstancia, era necesario que nuestro operador tuviera formalizado un acuerdo de OMV con un operador móvil con red de acceso. Hemos supuesto que UC3MOVIL había formalizado un acuerdo de acceso con ORANGE. Desde el punto de vista de la interconexión, resultaba interesante un acuerdo con ORANGE ya que disponía de un precio medio máximo de terminación más alto que MOVISTAR y VODAFONE durante el primer *glide-path*, sin las limitaciones que YOIGO podría ofrecer al tratarse de un operador nuevo en el mercado y disponiendo sólo de licencia de acceso 3G. Como ya hemos comentado, los precios medios máximos asignados para cada operador móvil virtual puro coinciden con los asignados para su operador *host* en cada periodo regulado.

La fecha de salida al mercado asignada a UC3MOVIL ha sido el 1 de octubre de 2005, y el periodo de regulación sobre el que se ha realizado el

análisis es el que va desde el 16 de octubre de 2008 hasta el 15 de abril de 2009. Teniendo en cuenta que el operador *host* de UC3MOVIL es ORANGE, el precio medio máximo en el periodo indicado es de 0,0803 €/minuto [5].

Uno de los pasos en el proceso de maximización de ingresos por tráfico de terminación de voz es la verificación de las tarifas. Como ya hemos explicado, estas tarifas se aplican sobre la expresión del precio medio obtenida según el método de los ponderadores de tráfico, a partir de datos referidos a un periodo prefijado. Hemos asumido que los datos de tráfico requeridos para esta comprobación por parte de la CMT para UC3MOVIL son los correspondientes al periodo que va desde mayo de 2007 a abril de 2008, ambos inclusive.

Para la maximización de ingresos provenientes del tráfico de terminación de voz en el periodo a analizar es necesario asignar a UC3MOVIL unos datos específicos, que obedezcan a una cuota de mercado, un volumen y unos perfiles de tráfico determinados. El proceso de generación de los datos de tráfico de terminación de UC3MOVIL será objeto de exposición pormenorizada en el capítulo 5, si bien procede en este punto adelantar las consideraciones más importantes tomadas en dicho proceso.

Para generar los datos de tráfico de UC3MOVIL ha sido necesario definir unos perfiles de tráfico que presentasen las propiedades de estacionalidad, periodicidad y tendencia descritas al principio de este capítulo, lo cual ha dado lugar a perfiles mensuales, semanales, diarios y horarios. Para definir los perfiles se han utilizado diferentes fuentes. Por un lado, los perfiles de Heegaard [Hee08] han sido la principal fuente de información para definir los perfiles diarios y horarios, ya que permiten reflejar los fenómenos de periodicidad diaria y horaria. Para los semanales y mensuales se han utilizado los datos de tráfico publicados por la CMT modulados por una cuota de mercado variable para reflejar los fenómenos de estacionalidad y tendencia específicos del mercado español. De forma complementaria se han utilizado los fenómenos de estacionalidad identificados para determinados meses (campaña de verano, efecto “cerrado por vacaciones”, campaña de Navidad y efecto “cuesta de enero”). También se ha considerado el caso particular del tráfico en los días festivos, habiendo asignado coeficientes de ponderación sobre el tráfico en cada uno de estos días dependiendo del carácter de la festividad

(nacional, autonómica o local). Finalmente, los datos de tráfico se han creado imprimiendo una componente aleatoria a los perfiles generados. En la siguiente figura mostramos la evolución trimestral del volumen de tráfico de terminación generado para UC3MOVIL.

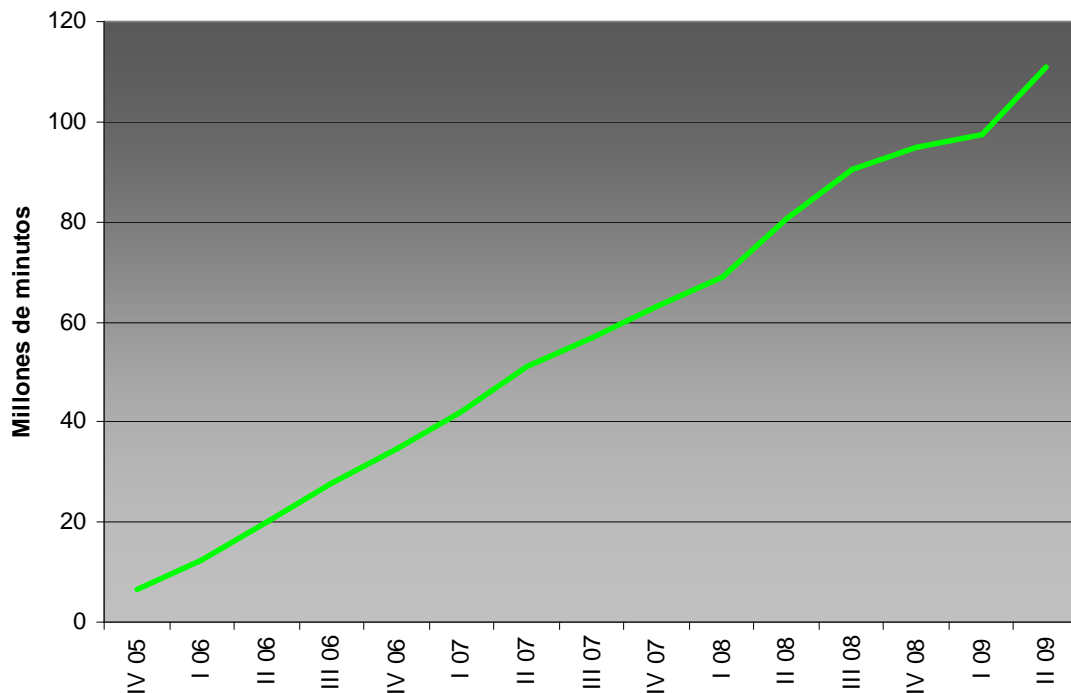


Figura 3.7 Evolución trimestral del tráfico de terminación de voz de UC3MOVIL

En lo sucesivo, este será considerado como el tráfico “real” de UC3MOVIL, pudiéndose apreciar ya el fenómeno de tendencia. El perfil base se ha obtenido ponderando el volumen total de tráfico de terminación de voz registrado en España por la cuota de mercado definida para UC3MOVIL.

Hemos considerado que la cuota de mercado de nuestro operador era del 1,5% al final del segundo trimestre de 2009 y que crecía a un ritmo lineal trimestral del 0,1% respecto del total del mercado. Tanto la cuota como el ritmo de crecimiento de UC3MOVIL resultan verosímiles en un mercado como el español. Como ejemplo, cabe indicar que la cuota de mercado alcanzada por YOIGO al final del segundo trimestre de 2009 es del 1,7% [15], teniendo en cuenta que su lanzamiento comercial se produjo en el año 2006. El detalle del tráfico mensual, diario y horario se expondrá en el capítulo 5, previamente a la descripción de las técnicas empleadas en el proceso de maximización de los

ingresos de UC3MOVIL por el tráfico de terminación. También hemos generado un determinado volumen de ingresos para UC3MOVIL, separando los ingresos de terminación de voz del resto.

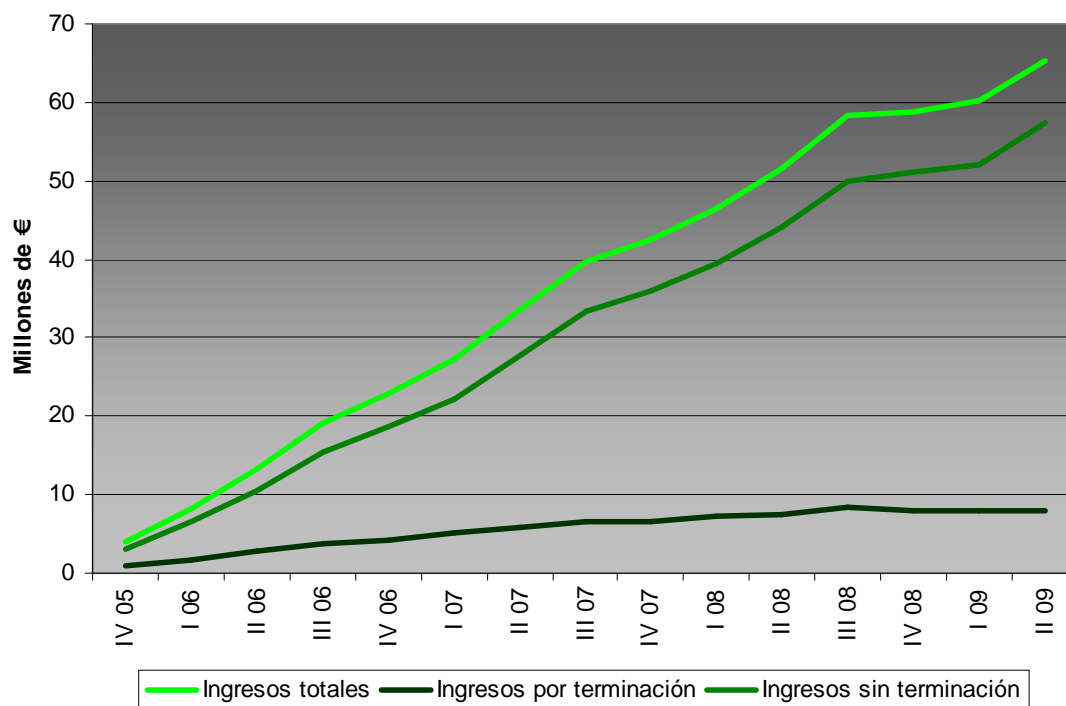


Figura 3.8 Evolución trimestral de los ingresos de UC3MOVIL

Los ingresos de terminación de UC3MOVIL se han calculado multiplicando el volumen de tráfico de terminación representado en la figura 3.7, expresado en millones de minutos, por un valor de ingreso medio igual al precio medio máximo de terminación en euros por minuto de UC3MOVIL (que es el de Orange) incrementado en un 2.5% (explicaremos después el por qué de este porcentaje).

Cabe indicar que en el análisis de los negocios mayoristas, es muy común reducir el efecto de cualquier esquema de tarificación a un ingreso medio, calculado como la relación entre el total de ingresos y el total de minutos cursados. Por su parte, el resto de ingresos se ha elaborado ponderando los ingresos obtenidos por los operadores móviles en España por la cuota de mercado definida para UC3MOVIL.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que los ingresos de terminación reflejados en la figura anterior para el periodo comprendido entre el 16 de

octubre de 2008 y el 15 de abril de 2009 no son fruto de la aplicación de nuestro sistema de maximización. Se han incluido en este momento para dar continuidad a la exposición del operador UC3MOVIL, y servirán como medida de comparación para la evaluación de los resultados obtenidos por nuestro procedimiento.

Vamos a concluir la exposición de UC3MOVIL con una breve explicación acerca del método empleado para asignar sus ingresos de terminación. Se puede considerar que el precio medio máximo de la CMT se corresponde con un esquema de tarificación básico, en el que hay una única franja y no hay ni establecimiento ni periodo de franquicia. De esta manera, podemos asumir que los ingresos que se obtendrían si se aplicase este precio medio máximo como tarifa nominal son los mínimos que un operador podría obtener. Así, cualquier mejora en los ingresos será únicamente imputable a las tarifas nominales y el esquema de tarificación aprobado para cada operador. De esta forma, ese incremento del 2,5% representa la supuesta mejora introducida por UC3MOVIL debida a los esquemas de tarificación empleados en cada periodo regulado. Como se verá en el capítulo 5, un 2,5% es un porcentaje de mejora razonable.

3.3.2. Análisis de impacto del procedimiento de maximización de ingresos de terminación

El objetivo general de un análisis de impacto es proporcionar información sobre las consecuencias derivadas de la implantación de un determinado proyecto sobre las diferentes áreas de la organización implicada. A partir de los resultados esperados tras la implantación del proyecto y de la magnitud y efecto de los cambios asociados a dicha implantación, se obtiene información relevante de cara a la toma de decisiones acerca del proyecto en cuestión. En un operador móvil, dependiendo del carácter del proyecto y del tipo de organización, el análisis de impacto puede reflejar cambios de muy diferente naturaleza, pudiendo afectar a infraestructuras y equipamiento del operador, a los sistemas de información, a la estructura organizativa, etc. En nuestro caso particular, el análisis de impacto sólo recoge aspectos económicos, ya que nuestro proyecto no requiere de recursos específicos ni afecta a diferentes áreas de la organización.

El impacto económico de la implantación de nuestro proyecto sobre el operador UC3MOVIL puede estimarse a partir de dos acciones. Por un lado, es necesario evaluar el impacto sobre los ingresos que se obtendrían por tráfico de terminación de voz, y por otro lado es necesario valorar el peso de dichos ingresos sobre el total de ingresos previstos para UC3MOVIL, suponiendo diferentes escenarios en el negocio global del operador.

Para evaluar el impacto de nuestro procedimiento sobre los ingresos de terminación, vamos a tomar como referencia el precio medio máximo impuesto por la CMT. Si aplicamos incrementos del precio medio de la CMT a modo de tarifa nominal, tenemos una medida del impacto de la implantación de nuestro procedimiento sobre los ingresos de terminación. Ahora bien, es necesario tener una previsión del tráfico que se va a tener, ya que al realizar un análisis de impacto real no se dispone de los datos de tráfico futuro. La previsión tiene que considerar diferentes volúmenes de tráfico para reflejar distintos escenarios de negocio. En nuestro caso particular, la previsión de tráfico de terminación para el análisis de impacto se ha realizado mediante una estimación lineal, tomando como datos de partida el volumen de tráfico mostrado en la figura 3.7, hasta el cuarto trimestre de 2008 (no incluido).

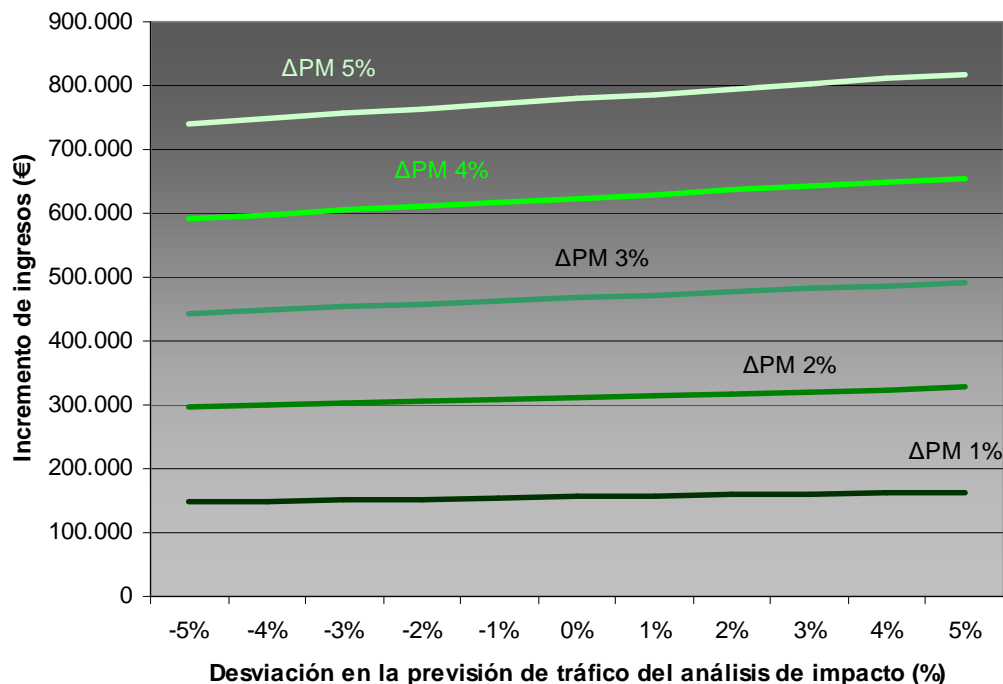


Figura 3.9 Incremento de los ingresos según la eficiencia del procedimiento

El resultado ha sido un volumen de tráfico de 194,1 millones de minutos en el periodo bajo análisis. En la figura 3.9 mostramos el aumento de ingresos que se produciría para incrementos del precio medio de la CMT que van desde el 1% (0,0811 €/minuto) al 5% (0,0843 €/minuto). Los representamos respecto de una escala de variación del tráfico de terminación previsto, desde un -5% (184,4 millones de minutos) hasta un +5% (203,8 millones de minutos). Es importante recalcar que esta previsión de tráfico así realizada no forma parte en ningún caso del procedimiento de maximización de ingresos desarrollado, simplemente es un paso necesario en el análisis de impacto.

La figura anterior permite cuantificar el efecto de la aplicación de nuestro procedimiento de maximización de ingresos de terminación en función de su buen funcionamiento. En el mejor escenario de negocio de terminación considerado, en el que el tráfico recibido es un 5% mayor del previsto, el buen funcionamiento de nuestro procedimiento podría conseguir unos ingresos superiores a 818.000€ para UC3MOVIL en el periodo de 6 meses, en caso de mejorar un 5% el precio medio de la CMT; esta situación es razonable, tal como se comprobará en el capítulo 5. De forma complementaria, en el peor escenario de negocio, si se mantiene un porcentaje de mejora del 5% respecto del precio medio, el aumento de ingresos sería de 740.000€. Se concluye por tanto que el incremento de ingresos es mucho más sensible al buen funcionamiento del procedimiento que a la variación del volumen del tráfico previsto.

Para evaluar el impacto del procedimiento sobre los resultados globales de UC3MOVIL, hemos calculado que porcentaje de los ingresos totales serían debidos al servicio de terminación según la eficiencia del procedimiento. Se ha considerado un tráfico de terminación constante con un volumen de 194,1 millones de minutos en el periodo bajo análisis, que es el resultado de la estimación lineal ya comentada. Este tráfico se ha aplicado a incrementos del precio medio de la CMT que van desde el 1% (0,0811 €/minuto) al 5% (0,0843 €/minuto), y se ha calculado la relación de los ingresos de terminación resultantes con el total de ingresos de UC3MOVIL. Los ingresos totales se han calculado como la suma de los ingresos de terminación más los ingresos debidos al resto de conceptos, donde estos últimos se han variado entre -10%

y el 10% respecto de los datos reflejados en la figura 3.8. En la figura siguiente se ilustran los diferentes escenarios de negocio planteados.

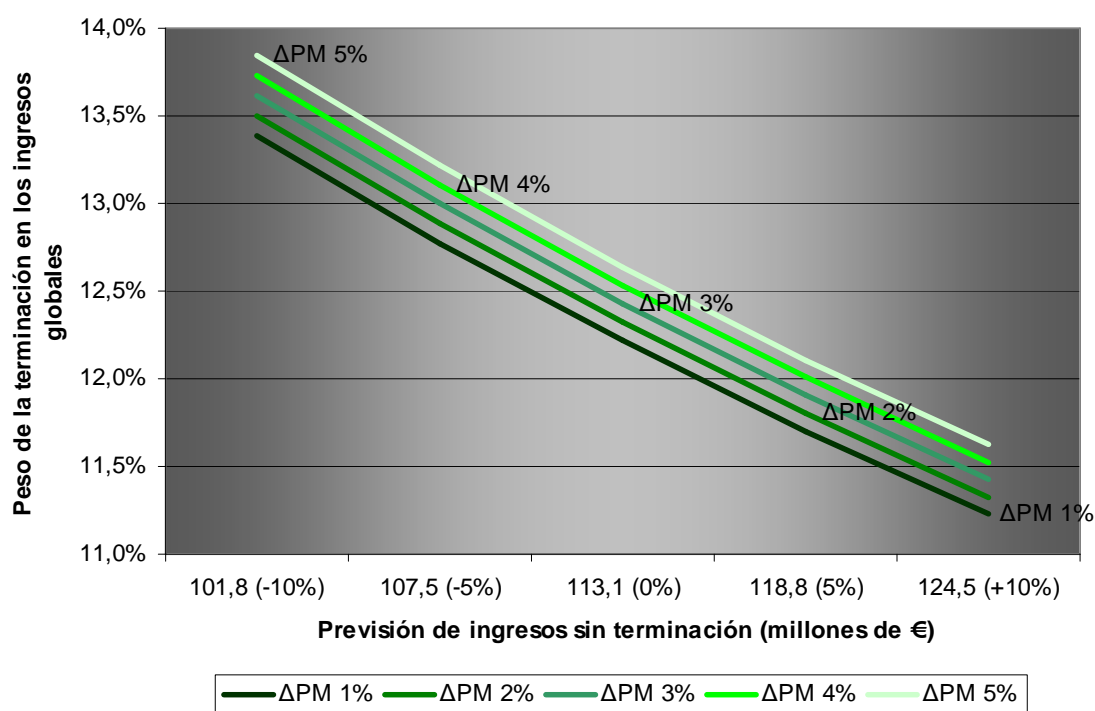


Figura 3.10 Peso de la terminación en los ingresos globales según la eficiencia del procedimiento

El escenario en que el servicio de terminación adquiere máximo peso en los resultados globales de UC3MOVIL es aquel en que los ingresos de terminación son máximos y los ingresos por el resto de conceptos son mínimos. En caso de tener ingresos mínimos por el resto de conceptos, el peso de este servicio podría variar desde el 13,4% al 13,8% en función de la eficiencia del procedimiento de maximización diseñado. Por el contrario, si los ingresos por el resto de conceptos fuesen máximos, el peso de la terminación podría variar desde el 11,2% al 11,6% del total de ingresos. En cualquier caso, se observa que la eficiencia del procedimiento puede alterar los resultados globales del operador en alrededor de un 0,4%.

Los resultados reflejan claramente la necesidad de utilizar un sistema de optimización de las tarifas nominales de terminación, ya que el peso de los ingresos asociados en las cuentas globales del operador es muy elevado.

3.3.3. Relación coste/beneficio

A la hora de describir un caso de negocio como el que nos ocupa, es habitual proponer un modelo de coste/beneficio. Estos modelos tratan evaluar los beneficios proporcionados por diferentes opciones de implementación para un mismo objetivo, caracterizando dichas opciones por medio de los costes que implicarían para la organización. Se trata por tanto de una herramienta muy útil para valorar diferentes alternativas de implementación.

En nuestro caso, dado que el proyecto consiste en un desarrollo de software que no requiere de recursos específicos, ni afecta a diferentes áreas de la organización, el coste sería constante. Los beneficios esperados son los resultados económicos que se acaban de exponer en el análisis de impacto, y son independientes del coste de implantación del proyecto.

3.3.4. Riesgos y posibles contingencias

Para evaluar los posibles riesgos que se asumirían al implantar el procedimiento desarrollado, es necesario analizar por separado cada uno de los objetivos parciales implicados.

En la predicción de tráfico, el mayor riesgo está en la incertidumbre asociada a la creación de dicho tráfico. En contra de lo que inicialmente se podría pensar, lo más importante no es predecir correctamente el volumen total de tráfico que se tendrá en el periodo analizado, sino que la predicción consiga reflejar el peso relativo de cada intervalo horario en el tráfico total. Esto es debido a que la relación de tráfico entre intervalos es lo que determina las franjas horarias. Por lo tanto, las eventuales variaciones en los patrones de tráfico son el origen de gran parte de la incertidumbre en la predicción. Estas variaciones en los patrones podrían verse influenciadas por contingencias tales como la aparición de campañas comerciales de la competencia (por ejemplo, la aparición de más tarifas planas en horario reducido) o por la aparición de nuevos agentes en el mercado (otros OMV). El enfoque de nuestro proyecto evita incluir este tipo de circunstancias, por lo que son la mayor fuente de riesgo.

Por otra parte, hay que tener en cuenta el error de predicción, que es la diferencia entre el tráfico predicho y el tráfico real utilizado en la predicción. Este error se produce por tener información limitada sobre el tráfico a predecir. Tal como se expondrá en el capítulo 4, este error debe ser lo suficientemente bajo como para garantizar una buena ejecución, pero no demasiado, ya que entonces el tráfico predicho se parecería demasiado al tráfico utilizado en el proceso, y se perdería la generalización necesaria en toda predicción.

En la optimización de tarifas, el riesgo es prácticamente nulo, ya que la única contingencia que podría darse sería no alcanzar las mejores tarifas posibles. Tal como se expondrá a continuación en el capítulo 4, el algoritmo utilizado para la optimización de las tarifas garantiza alcanzar un máximo global de los ingresos, por lo que cualquier error en la selección del esquema de tarificación, las franjas horarias o los valores nominales de las tarifas sería debido a un error en la predicción y no a un error en el proceso de optimización de las tarifas.

3.3.5. Conclusiones del estudio

Para terminar la exposición del caso de estudio, vamos a enumerar las conclusiones más importantes que se han obtenido:

1. Los ingresos derivados del tráfico de terminación de voz son mucho más sensibles al buen funcionamiento del procedimiento diseñado que a la variación del volumen del tráfico previsto.
2. Es imprescindible utilizar un sistema de optimización de las tarifas nominales de terminación, ya que el peso de los ingresos asociados en las cuentas globales del operador es muy elevado.
3. El beneficio esperado del proyecto es independiente del coste de su implantación.
4. Las desviaciones del tráfico respecto de los patrones esperados son la mayor fuente de riesgo en la implantación del proyecto. El volumen absoluto de tráfico predicho no influye.

CAPÍTULO 4

PLANTEAMIENTO TEÓRICO. MÉTODOS DE PREDICCIÓN Y OPTIMIZACIÓN

El objetivo de este capítulo es describir la base teórica de las técnicas de predicción y optimización que se han empleado en el desarrollo del proyecto. De cara a la optimización, se repasarán las principales técnicas de búsqueda local y global, mientras que para la predicción, se describirá la regresión lineal, los perceptrones monocapa y multicapa y los procesos gaussianos. El lector que ya domine estas técnicas puede proseguir la lectura con el capítulo 5.

Como hemos venido adelantando, para la maximización de los ingresos de un operador móvil por la prestación del servicio de terminación de voz es necesario realizar una tarea de predicción y otra de optimización, que están relacionadas entre sí, de modo que es necesario predecir el tráfico que se recibiría en el periodo a analizar para la optimización las tarifas asociadas. La implementación de estas tareas requiere del uso de técnicas de procesamiento digital de la información. En este capítulo describiremos la base teórica en que se fundamentan las que hemos utilizado.

Contenido del capítulo

El capítulo está dividido en dos apartados. En el primero describiremos las técnicas de optimización más apropiadas para resolver nuestro problema, distinguiendo entre métodos de búsqueda local y búsqueda global:

- Búsqueda local. Presentaremos las características básicas y limitaciones de estas técnicas, centrándonos en los algoritmos de gradiente.
- Búsqueda global. Destacaremos las características generales de estas técnicas, destacando su gran potencia de búsqueda. Describiremos varias de estas técnicas, incluyendo los Algoritmos Evolutivos, el Temple Simulado, y la Inteligencia de Enjambre. Acabaremos indicando cómo los algoritmos evolutivos son la técnica más apropiada para nuestro caso por su potencia de búsqueda y adecuación al problema.

En el segundo apartado presentamos el conjunto de métodos de predicción que hemos empleado, centrándonos en los denominados *métodos máquina*, que son técnicas de procesamiento de información caracterizadas por no presuponer una expresión analítica cerrada para modelar el problema a resolver. Hemos aplicado los siguientes métodos:

- Regresión lineal. Describiremos esta técnica, caracterizada porque la salida se obtiene como una combinación lineal de las componentes de la entrada, siendo estas las variables relevantes temporales que hemos visto en el capítulo 3. Destacaremos su sencillo entrenamiento, al realizarse por mínimos cuadrados.
- Perceptrón monocapa. Lo veremos como una extensión de la regresión lineal, a cuyo modelo se le ha añadido una etapa no lineal. Veremos que se pueden entrenar por medio del algoritmo de gradiente y concluiremos su descripción presentándolo como la unidad básica sobre la que se apoyan los perceptrones multicapa.
- Perceptrón multicapa. Lo describiremos como un tipo de red neuronal. expondremos su arquitectura, basada en capas de perceptrones, y explicaremos su método de entrenamiento, denominado *algoritmo de retropropagación*.

- Procesos gaussianos. Los presentaremos como una generalización de la función de distribución de probabilidad gaussiana. Veremos como un proceso gaussiano queda caracterizado fundamentalmente por su función de covarianza. Explicaremos su método de entrenamiento y concluiremos el estudio indicando que por sus características, son una solución muy apropiada para modelar el tráfico de terminación de voz.

4.1. TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN

De forma general se puede considerar que la optimización consiste en la búsqueda de la mejor solución posible para un problema determinado. En el contexto en que se desarrolla el presente proyecto, el proceso de optimización consiste en el diseño y la aplicación de un algoritmo de búsqueda de las tarifas nominales de terminación de voz que maximicen los ingresos de un operador dado en un periodo concreto, teniendo en cuenta la limitación impuesta por el precio medio máximo fijado por la CMT.

Es habitual describir los problemas de optimización como el nuestro a partir de la definición de una función que permita evaluar la bondad de las posibles soluciones al problema planteado. En nuestro caso, cada posible solución estará compuesta por el esquema de tarificación y los valores de las tarifas nominales de terminación de voz, mientras que la función de evaluación debe ser tal que permita calcular los ingresos de terminación que se obtendrían con estas tarifas para el tráfico que se recibiría en el periodo de tiempo evaluado. De esta forma, una solución será mejor que otra si proporciona mayores ingresos. Por lo tanto, el objetivo del algoritmo sería encontrar el máximo de la función de evaluación de los ingresos de terminación.

Existen diferentes tipos de técnicas de optimización que podrían utilizarse para resolver problemas como el que se presenta, pudiendo establecerse diferentes criterios para clasificarlas. Nos centraremos en dos grupos de técnicas, en función del tipo de búsqueda que realizan para la consecución del objetivo. Así, tenemos las técnicas de búsqueda local y las técnicas de búsqueda global.

4.1.1. Búsqueda local

Los algoritmos de búsqueda local se basan en la obtención de un máximo o un mínimo parcial de la función de evaluación, dentro del espacio de posibles soluciones al problema. Si se trata de evaluar un beneficio se buscará un máximo, mientras que si se trata de evaluar un perjuicio o coste se buscará un mínimo. En ambos casos, estos algoritmos recorren el espacio aplicando diferentes soluciones próximas entre sí, de forma iterativa.

Los algoritmos de búsqueda local se consideran incompletos, ya que la búsqueda se puede detener sin haber encontrado la solución óptima. Esto es debido a que no hay garantía de que el algoritmo converja a dicha solución si el punto de inicialización no se encuentra suficientemente próximo a la misma o la función de evaluación no ofrece las características adecuadas. Por este motivo, es habitual usar como criterio para detener estos algoritmos el establecimiento de un número máximo de ciclos de ejecución para los que no haya habido mejora apreciable en el resultado, o incluso métodos más drásticos, como puede ser la fijación de un tiempo de máximo de ejecución o un número máximo de ciclos del algoritmo, sin tener en cuenta el resultado.

Dentro de los métodos de búsqueda local son muy populares los *algoritmos de gradiente* [Hay95]. Estos algoritmos se basan en construir cada nueva posible solución modificando la solución anterior según la dirección de máxima variación de la función de evaluación, que viene dada por el gradiente. De esta forma, si se trata de conseguir un máximo, se toma el sentido positivo del gradiente, mientras que si se trata de obtener un mínimo de la función de evaluación, se toma el sentido negativo del gradiente. Si consideramos que cada solución es representable a partir de un vector de coeficientes \mathbf{w} , podemos expresar el algoritmo de gradiente como:

$$\mathbf{w}^{\text{NUEVO}} = \mathbf{w}^{\text{ANTERIOR}} \pm \eta \nabla \{f(\mathbf{w}^{\text{ANTERIOR}})\} \quad (4.1)$$

Donde $f(\mathbf{w})$ representa a la función de evaluación y η es un coeficiente denominado paso de adaptación, que permite parametrizar el grado de variación aplicado. Si se trabaja con muestras y se procede de forma

secuencial, muestra a muestra, el procedimiento se denomina algoritmo secuencial del gradiente.

Entre otros métodos de búsqueda local muy empleados tenemos la búsqueda en línea, donde se elige previamente una dirección de variación, los algoritmos de gradiente conjugado, en los que no se altera lo progresado en búsquedas anteriores obligando en cada paso a que el gradiente sea ortogonal a la dirección de búsqueda previa, o los métodos de Newton, basados en el cálculo de las raíces del gradiente de la función de evaluación.

4.1.2. Búsqueda global

Los algoritmos de búsqueda global se caracterizan por perseguir el máximo o un mínimo total de la función de evaluación, dentro del espacio de posibles soluciones al problema. El hecho de estar diseñados para la consecución de la solución óptima hace que estos algoritmos tengan en general una complejidad y un coste de cómputo elevados. Por este motivo, sólo se suelen aplicar cuando el esfuerzo adicional que conllevan esté justificado frente a la ejecución de un algoritmo de búsqueda local. En nuestro caso, el empleo de un método de búsqueda global está perfectamente justificado, ya que la aplicación de unas tarifas nominales de terminación de voz subóptimas puede tener un fuerte impacto negativo en la cuenta de resultados de un operador móvil, debido al gran peso de los ingresos de terminación en los ingresos totales del operador.

Se pueden establecer diferentes enfoques para afrontar un problema de búsqueda global. Por las particularidades que presenta el problema de optimización que se plantea en nuestro proyecto, resulta conveniente recurrir a los métodos estocásticos de optimización [Dud+01], que se caracterizan por poder incluir elementos aleatorios tanto en el diseño del algoritmo como en los datos de origen del propio problema a resolver. Los métodos estocásticos surgen como contraposición a los métodos deterministas, en los que no se considera elemento aleatorio alguno.

Los métodos estocásticos de optimización permiten establecer procedimientos de gran potencia para la exploración del espacio de búsqueda y la explotación de los resultados, lo cual es imprescindible en nuestro caso, ya

que nuestro espacio es complejo y grande. Como ya hemos indicado, cada posible solución está compuesta por el esquema de tarificación y los valores de las tarifas nominales de terminación de voz. El esquema de tarificación está a su vez formado por un término de establecimiento o un periodo de franquicia, junto con los horarios de las distintas franjas, donde la tarifa de la franja reducida por definición debe ser menor o igual a la tarifa de la franja normal. Además, las soluciones deben respetar el precio medio máximo de la CMT. Como consecuencia, las soluciones presentan elevada complejidad y fuerte carácter no lineal, lo cual dificulta en gran medida la aplicación de métodos deterministas. Por otra parte, cabe indicar que la información de partida es de naturaleza no determinista, al provenir del resultado de la predicción de tráfico de terminación de voz para el periodo bajo análisis, tal como ya se ha explicado en detalle en el capítulo 3.

Los motivos que acabamos de exponer hacen que los métodos estocásticos sean una alternativa adecuada para la optimización de las tarifas de terminación de voz. A continuación describiremos las características más relevantes de algunos de estos métodos.

- Algoritmos evolutivos. Se trata de un conjunto de métodos iterativos caracterizados por buscar la solución óptima dentro de un grupo de posibles soluciones sobre las que se van realizando modificaciones de carácter aleatorio, conforme a unos operadores concretos [Dud+01]. Se denominan así al ser técnicas inspiradas en los procesos evolutivos que aparecen en la biología. Cada posible solución se suele denominar *individuo* o *fenotipo*, mientras que las características propias de cada individuo suelen ser referidas como *cromosomas*, *genes* o *genotipos*. El conjunto de individuos se suele llamar *población*. En nuestro caso particular, en el que tratamos de optimizar las tarifas nominales de terminación de voz, los cromosomas serían los elementos que forman el esquema de tarificación (es decir, si hay periodo de franquicia o término de establecimiento y los intervalos horarios de las franjas normal y reducida), de forma que cada individuo estaría formado por un conjunto concreto de valores reales referidos a esos elementos.

La versión más clásica de estas técnicas es el *Algoritmo Genético Básico* (AGB), en el que los cromosomas de cada individuo se representan por medio de tiras binarias de “0” y “1”. Sin embargo, esta codificación resulta poco eficiente para multitud de situaciones, como es el caso de nuestro problema, en el que cada cromosoma se tiene que representar por medio de números reales.

El funcionamiento general de un algoritmo evolutivo se puede describir en los siguientes pasos:

1. **INICIALIZACIÓN.** Se construye una población inicial de forma aleatoria, de modo que se cubra ampliamente el espacio de posibles soluciones. En caso de tener información previa sobre el problema, se pueden inicializar ciertos individuos en zonas del espacio de búsqueda susceptibles de albergar a la solución óptima. El tamaño de la población depende de la naturaleza del problema, pudiendo ser del orden de miles de individuos.
2. **SELECCIÓN.** En cada generación, se selecciona una parte de la población para crear la generación siguiente, mientras que los individuos no seleccionados se descartan, pudiendo ser sustituidos por otros nuevos. La selección se suele realizar en función de la calidad de cada individuo, de forma que los mejores individuos deberán servir de base para la siguiente generación. La calidad de cada individuo se obtiene por medio de la función de evaluación, que se suele denominar función de ajuste o *fitness* cuando se trabaja con algoritmos evolutivos. Existen situaciones en las que resulta conveniente evaluar solamente una parte de la población, ya que se trata de un proceso con un coste de cómputo muy elevado. También es común incluir nuevos individuos creados de forma aleatoria o incluso permitir que ciertos individuos de baja calidad también se empleen en la creación de la siguiente generación. Esto ayuda a mantener la diversidad genética en poblaciones grandes, tratando así de evitar que el algoritmo converja a una solución subóptima.

Cabe recordar que nuestra función de ajuste ha de ser el resultado de aplicar las tarifas seleccionadas al tráfico de terminación de voz que se haya predicho para el periodo bajo estudio, de forma que los mejores individuos serán aquellos que proporcionen mayores ingresos para ese tráfico de terminación.

3. DETENCIÓN. Una vez evaluada la población, se puede comprobar si se ha alcanzado el criterio de detención del algoritmo. El criterio de detención del algoritmo depende del problema en cuestión, si bien son habituales los siguientes planteamientos:

- Se ha encontrado una solución suficientemente buena. En nuestro caso, sería haber encontrado unas tarifas que proporcionasen unos ingresos determinados. Sin embargo, ya adelantamos que este criterio no es adecuado para nuestro problema, ya que nuestro objetivo es encontrar las tarifas que maximicen los ingresos de terminación.
- Se ha alcanzado un número máximo de iteraciones (o generaciones) del algoritmo.
- El algoritmo se ha estancado, de forma que sucesivas generaciones no mejoran los resultados de generaciones anteriores.
- Inspección manual.
- Otros métodos.
- Una combinación de las anteriores.

4. REPRODUCCIÓN. Para crear la siguiente generación se suelen emplear los operadores genéticos *cruce* y *mutación*.

- CRUCE. Consiste en obtener nuevos individuos a partir de la combinación de los cromosomas de dos o más individuos ya existentes. Se aplican diferentes métodos de cruce en función del tipo de codificación; así, cuando se trabaja con codificación binaria, se suele dividir la cadena

de bits de cada cromosoma por un punto aleatorio y se intercambian las partes resultantes entre los individuos implicados. En caso de trabajar con codificación real, se suele seleccionar aleatoriamente el porcentaje de cruce entre el 0% y el 100%, construyendo los cromosomas de los nuevos individuos como la suma ponderada de los cromosomas de los individuos cruzados.

- **MUTACIÓN.** Consiste en modificar aleatoriamente los genes de los individuos.

Aparte del cruce y la mutación, los algoritmos evolutivos permiten incorporar de forma sencilla operadores específicos para cada problema, lo cual aumenta su potencia de búsqueda y su eficiencia. La aplicación selectiva y recurrente tanto de los operadores de cruce y mutación como de los específicos hace que la calidad media se incremente a cada nueva generación, de modo que se repiten las acciones 2, 3 y 4 (selección, detención y reproducción) hasta que se alcanza el criterio de parada definido.

Estos algoritmos además permiten parametrizar en cierta medida el elevado coste de cómputo asociado a los algoritmos de búsqueda global variando el tamaño de la población. Este enfoque da lugar a las denominadas *estrategias evolutivas*. Estas técnicas se caracterizan por partir de un individuo principal, llamado comúnmente *padre*, del que se obtiene un conjunto de nuevos individuos, llamados *descendientes* o *mutantes*, resultado de la mutación del padre. Tras la creación de una nueva generación se evalúa calidad de toda la población y se compara con la del padre actual, de forma que cada descendiente compite con su padre para convertirse en el padre de la siguiente generación.

- Temple simulado. Es otro de los métodos estocásticos de optimización clásicos, junto con los algoritmos evolutivos. Se denomina así por analogía entre su forma de proceder y el proceso de temple de los metales [Dud+01]. Se trata de algoritmos iterativos en los que la selección de una nueva solución depende de los

resultados que proporcione y del valor de un parámetro global denominado *temperatura*, T , que decrece gradualmente conforme avanza el algoritmo. El objetivo es evitar que el algoritmo converja a un mínimo local, para lo que se introduce la posibilidad de cambiar a una nueva solución incluso si presenta peores resultados que la anterior. Para ello, se utiliza el parámetro T de tal forma que al principio del algoritmo, cuando T es grande, el cambio respecto de la solución anterior es prácticamente aleatorio, mientras que conforme la ejecución del algoritmo va avanzando, la probabilidad de cambiar a una solución peor que la anterior se reduce, debido a la disminución progresiva del parámetro T .

Por su forma de proceder, son algoritmos muy utilizados en problemas en los que el espacio de búsqueda es discreto, y para los que la inspección directa de todas las posibles soluciones resulta inabordable por tiempo de cómputo. La variante más empleada de este tipo de algoritmos es el denominado *aprendizaje de Boltzmann* [Dud+01], en el que a cada nueva iteración, se construye una nueva posible solución modificando de forma aleatoria los diferentes parámetros de la solución anterior.

- Inteligencia de enjambre (*swarm intelligence*). Son algoritmos de optimización estocásticos inspirados en el comportamiento colectivo de colonias de insectos sociales u otras sociedades de animales [Bon+99]. Son sistemas formados por un conjunto de elementos denominados agentes que interactúan entre sí y con su entorno de forma autónoma realizando un número reducido de acciones muy sencillas. Por esto, se dice que son sistemas descentralizados y auto-organizados.

Dentro de este tipo de métodos se encuentran los algoritmos de optimización por enjambre de partículas (*Particle Swarm Optimization Algorithms*), diseñados para resolver problemas en los que la mejor solución puede ser representada como un punto móvil en una superficie de múltiples dimensiones. Dado que las tarifas nominales de terminación de voz pueden ser consideradas como puntos de una

superficie de varias dimensiones (establecimiento o franquicia y tarifas nominales por cada franja horaria), los algoritmos de enjambre de partículas son una alternativa a considerar para resolver el problema de optimización que se nos presenta.

En estos algoritmos, las posibles soluciones o *partículas* se sitúan en el espacio con una velocidad inicial determinada y con un canal de comunicación establecido con un grupo de partículas predefinido. Las partículas se mueven sobre la superficie de posibles soluciones, evaluando su calidad tras cada paso. Conforme avanza el algoritmo, las partículas se desplazan más rápidamente hacia aquellas otras partículas de mayor calidad con las que tenga comunicación. De esta forma, los movimientos de las partículas están dirigidos hacia zonas del espacio de mayor calidad.

Tanto los algoritmos evolutivos como el temple simulado o la inteligencia de enjambre se encuentran entre los métodos estocásticos de búsqueda global susceptibles de ser empleados para resolver nuestro problema de optimización. Todos ellos proporcionan la potencia de búsqueda necesaria, que es el principal requisito que deben cumplir, pero hay otros factores que hay que tener en cuenta como es la posibilidad de modelar los sistemas de tarificación de forma sencilla o la posibilidad de introducir la restricción dada por el precio medio máximo de terminación que describimos en el capítulo 3. Teniendo en cuenta estas características y los requerimientos de nuestro problema de optimización, nos hemos decantado por implementar un algoritmo evolutivo para resolverlo. Tal como se verá en el capítulo 5, la implementación del algoritmo evolutivo conduce a la maximización de los ingresos de terminación de voz, con una complejidad reducida y un coste de cómputo bajo, por lo que se trata de una elección correcta que cumple con los objetivos del proyecto.

4.2. MÉTODOS DE PREDICCIÓN

Una de las tareas principales a realizar en este proyecto es el diseño de un sistema de predicción del tráfico de terminación de voz, el cual viene dado tanto por los minutos como por las llamadas recibidas en la red del operador

móvil. La información de partida disponible son los valores tomados por ambas variables en función del tiempo, representado por el conjunto de variables temporales relevantes que ya vimos en el capítulo 3 (fecha, el día de la semana, indicador de festivo, día del año y semana del año).

De forma general, cuando se dispone de un conjunto representativo de muestras etiquetadas de la variable a estimar, existe la opción de utilizarlas para diseñar una máquina específica con la suficiente capacidad expresiva para modelar el problema en cuestión. Así, dado un conjunto de entradas \mathbf{x} para las que se conoce la salida y , el objetivo de la máquina es obtener predicciones de y para nuevas entradas \mathbf{x}^* no incluidas en el conjunto de entrenamiento. Esta forma de proceder se denomina aprendizaje supervisado, y se utiliza en el conjunto de métodos máquina que se han empleado para el diseño de nuestra herramienta de predicción de tráfico de terminación de voz.

Comúnmente, la entrada de la máquina se suele representar por un vector \mathbf{x} , cuyas componentes son variables independientes, mientras que la salida se suele expresar como una variable dependiente y . En nuestro caso, la variable y podría ser el número de llamadas o el número de minutos de tráfico de terminación de voz recibidos, mientras que las componentes x_i del vector \mathbf{x} podrían ser las variables temporales relevantes.

4.2.1. Regresión Lineal

La regresión lineal se basa en suponer que la variable y a estimar es una combinación lineal de las componentes x_i del vector \mathbf{x} de entrada [The92]. La relación entre ambas se establece como sigue:

$$y = \mathbf{w}^T \mathbf{x} + w_0 = \mathbf{w}_e^T \mathbf{x}_e \quad (4.2)$$

Donde \mathbf{w} es un vector de coeficientes y w_0 es un sesgo, que se suelen expresar de forma compacta por medio del vector \mathbf{w}_e , junto con la versión extendida del vector \mathbf{x} . Es decir, estos vectores se expresan respectivamente como $\mathbf{w}_e = [w_0 \ w_1 \ w_2 \ w_3 \dots \ w_N]^T$ y $\mathbf{x}_e = [1 \ x_1 \ x_2 \ x_3 \dots \ x_N]^T$.

Es común representar gráficamente la regresión lineal en la siguiente forma:

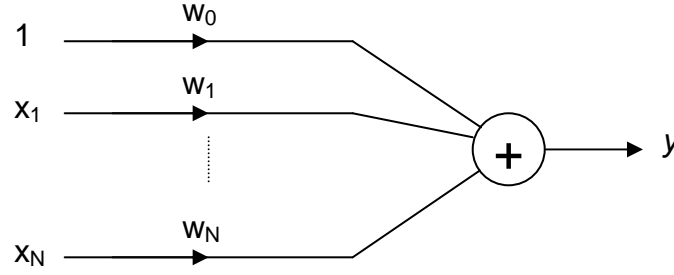


Figura 4.1 Representación gráfica del regresor lineal

Nosotros trabajaremos con observaciones del vector \mathbf{x} , de modo que a cada observación le corresponderá un valor de la variable dependiente y . Esto implica que tendremos un vector \mathbf{y} con los valores de esta variable para cada muestra de \mathbf{x} , donde cada componente x_i será a su vez un vector de K muestras. Esto da lugar a una matriz \mathbf{X}_e de la forma:

$$\mathbf{X}_e = \begin{bmatrix} 1 & x_1^{(1)} & x_2^{(1)} & \dots & x_N^{(1)} \\ 1 & x_1^{(2)} & x_2^{(2)} & \dots & x_N^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_1^{(K)} & x_2^{(K)} & \dots & x_N^{(K)} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

La clave de la regresión lineal radica en suponer que y es una variable determinista a la que se ha añadido un término aleatorio de media nula e igual varianza para cada observación. Bajo este supuesto, si denominamos $\boldsymbol{\varepsilon}$ al vector de términos aleatorios añadidos a \mathbf{X}_e , podemos expresar:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{y}^* - \mathbf{w}_e^T \mathbf{X}_e \quad (4.4)$$

Donde \mathbf{y}^* representa la predicción de \mathbf{y} . El ajuste de los coeficientes se realiza un ajuste por mínimos cuadrados, de forma que se minimiza el error total observado. Se puede demostrar que el error cuadrático es mínimo cuando $\boldsymbol{\varepsilon}$ es ortogonal a los datos, por lo que su producto escalar debe ser nulo. Este fenómeno se denomina *principio de ortogonalidad*, y podemos expresarlo así:

$$\mathbf{X}_e^T \cdot \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{0} \quad (4.5)$$

Considerando las dos expresiones anteriores, los coeficientes \mathbf{w}_e se calculan operando con la matriz \mathbf{X}_e y con el vector \mathbf{y} como sigue:

$$\mathbf{w}_e = (\mathbf{X}_e^T \mathbf{X}_e)^{-1} \mathbf{X}_e^T \mathbf{y} \quad (4.6)$$

La matriz factor de \mathbf{y} se denomina pseudo inversa de Moore-Penrose. Cabe indicar que la regresión lineal ha sido el método utilizado para realizar la predicción del tráfico de terminación y los ingresos del operador ficticio UC3MOVIL en el caso de negocio descrito en el capítulo 3.

4.2.2. Perceptrón Monocapa

El perceptrón monocapa es una máquina empleada en problemas de decisión y estimación que está formada por dos etapas, una primera con estructura lineal y la segunda con estructura no lineal [Hay99]. La primera etapa es equivalente al estimador lineal expuesto en el punto anterior, mientras que la segunda es la denominada función de activación, incluida para incrementar la capacidad expresiva de la máquina. Esta función puede ser un decisor, en cuyo caso se habla de perceptrón monocapa “duro”, o bien una función derivable, dando lugar al perceptrón monocapa “blando” o de activación blanda. Por esto, los perceptrones monocapa son útiles en problema de decisión y estimación. En nuestro caso, es de interés únicamente el perceptrón con función de activación blanda, ya que es el modelo utilizado en problemas de predicción. Es común representar el perceptrón monocapa con función de activación blanda en la forma siguiente:

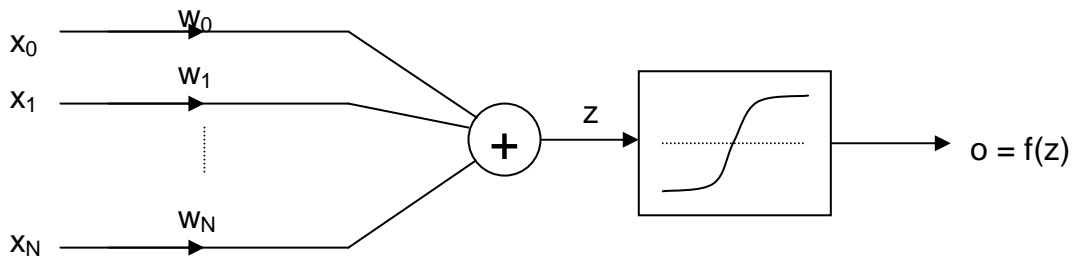


Figura 4.2 Representación gráfica del perceptrón monocapa con activación blanda

En la figura anterior hemos denominado a la salida de la etapa lineal como $z = \mathbf{w}^T \mathbf{x} + w_0 = \mathbf{w}_e^T \mathbf{x}_e$, mientras que la salida final del perceptrón se ha denominado $o = f(z) = f(\mathbf{w}_e^T \mathbf{x}_e)$.

El cálculo de los coeficientes se realiza mediante ejemplos, formados valores concretos de \mathbf{x} para los que se conoce la salida final y . En el caso del perceptrón, los coeficientes se calculan aplicando muestra a muestra el algoritmo secuencial de gradiente descrito al principio del capítulo. Para ello, se calcula el error cuadrático para cada muestra, dado como:

$$\varepsilon = [y^{(k)} - o^{(k)}]^2 = [y^{(k)} - f(\mathbf{w}_e^{(k)\top} \mathbf{x}_e^{(k)})]^2 = [y^{(k)} - f(z^{(k)})]^2 \quad (4.7)$$

Donde $o^{(k)}$ e $y^{(k)}$ representan respectivamente el valor obtenido a la salida del perceptrón y el valor de la variable a estimar correspondientes a la k -ésima muestra. Con esto, el algoritmo secuencial de gradiente permite actualizar los pesos aplicando la regla de la cadena:

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_e^{(k+1)} &= \mathbf{w}_e^{(k)} - \frac{\eta}{2} \frac{\partial [y^{(k)} - f(z^{(k)})]^2}{\partial \mathbf{w}_e} = \mathbf{w}_e^{(k)} + \eta [y^{(k)} - f(z^{(k)})] \frac{\partial f(z^{(k)})}{\partial z} \frac{\partial z^{(k)}}{\partial \mathbf{w}_e} \Rightarrow \\ \mathbf{w}_e^{(k+1)} &= \mathbf{w}_e^{(k)} + \eta [y^{(k)} - f(z^{(k)})] \cdot f'(z^{(k)}) \mathbf{x}_e^{(k)} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Es típico tomar como función de activación o la tangente hiperbólica o bien la sigmoide, debido a la forma que presentan y la sencillez de sus derivadas. La función tangente hiperbólica tiene la siguiente expresión:

$$f(z) = \tanh(z) = \frac{1 - e^{-z}}{1 + e^{-z}} \quad (4.9)$$

La salida de esta función se encontrará en el intervalo $(-1,1)$ para cualquier valor real de la variable z . Su derivada es:

$$f'(z) = \frac{\partial \tanh(z)}{\partial z} = 1 - \tanh^2(z) \quad (4.10)$$

Por su parte, la función sigmoide se expresa como:

$$f(z) = \text{sgm}(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (4.11)$$

Y la salida de la sigmoide estará en el intervalo $(0,1)$. Y su derivada es:

$$f'(z) = \frac{\partial \text{sgm}(z)}{\partial z} = \text{sgm}(z)[1 - \text{sgm}(z)] \quad (4.12)$$

El uso de una u otra función dependerá del rango de variación de la variable de salida. La forma de estas dos funciones se presenta a continuación.

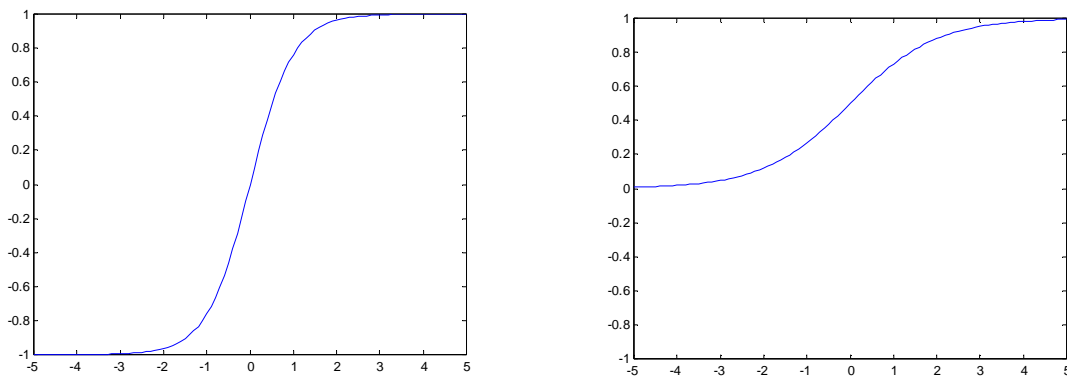


Figura 4.3 Funciones tangente hiperbólica (izquierda) y sigmoide (derecha)

Los perceptrones monocapa con activación blanda tienen la posibilidad trabajar en paralelo dispuestos en capas, formando lo que se conoce como perceptrones multicapa. Las máquinas formadas por unidades no lineales sencillas dispuestas en capas y con arquitectura en paralelo se denominan *redes neuronales* [Hay99]. Al tener una función de activación derivable, los perceptrones (también llamados *neuronas* o *nodos*) pueden propagar la diferencia entre la salida obtenida y la esperada para cada muestra hacia los perceptrones de capas inferiores. Este procedimiento de entrenamiento supervisado se conoce como Algoritmo de Retropropagación (*Back-propagation Algorithm*), y es lo que permite calcular los coeficientes de todos los perceptrones de la red.

El perceptrón multicapa es una de las técnicas empleadas en el diseño de la herramienta de predicción desarrollada, por lo que comentaremos a continuación sus características más importantes.

4.2.3. Perceptrón multicapa

Es uno de los tipos de redes neuronales más importante. La arquitectura típica está formada por una capa de entrada, una o más capas ocultas y una capa de salida [Hay99]. En la siguiente figura mostramos un ejemplo con dos capas ocultas, donde cada línea que interconecta dos nodos tendrá asociado un peso o coeficiente que deberá ser calculado.

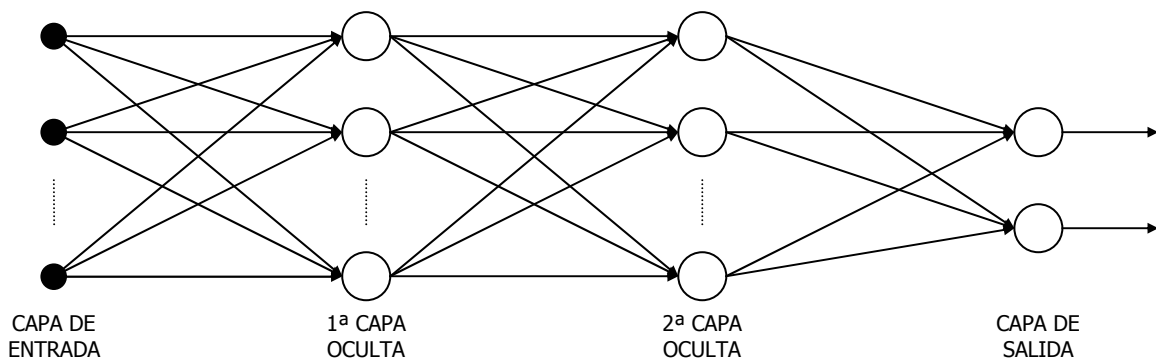


Figura 4.4 Arquitectura de un perceptrón multicapa con dos capas ocultas

La capa de entrada conecta cada una de las componentes del vector de entrada a las neuronas de la primera capa oculta, mientras que la capa de salida ofrece las posibles salidas de la red. Las neuronas que forman las capas ocultas proporcionan a la red su capacidad expresiva, de forma que con el número adecuado de neuronas, un perceptrón multicapa es capaz de establecer cualquier correspondencia entre entrada y salida. Sin embargo, hay que indicar que estas redes no son auto-constructivas, por lo que el dimensionado óptimo no se puede conocer a priori. Esto significa que la implementación de un mayor número de capas no tiene por que ser adecuado o útil siquiera. Antes de continuar, resulta conveniente exponer la notación que utilizaremos en lo sucesivo. Para ello, nos apoyamos en la siguiente figura, que representa una neurona genérica dentro de la red de un perceptrón multicapa.

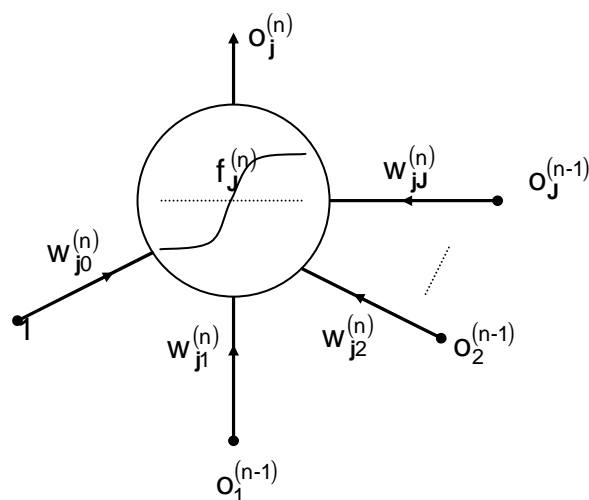


Figura 4.5 Neurona j-ésima de la capa n

Donde:

- $f_j^{(n)}$: Función de activación de la neurona j-ésima de la capa n
- $o_j^{(n)}$: Salida observada de la neurona j-ésima de la capa n
- $w_{ij}^{(n)}$: Coeficiente i-ésimo de la neurona j-ésima de la capa n
- $o_i^{(n-1)}$: Salida observada de la neurona i-ésima de la capa n-1. Es además la entrada a la rama i-ésima de cualquier neurona de capa n.

Y por lo tanto:

$$o_j^{(n)} = f_j^{(n)} \left(w_{j0}^{(n)} + \sum_i w_{ji}^{(n)} \cdot o_i^{(n-1)} \right) \quad (4.13)$$

Como ya hemos adelantado al final del punto anterior, los perceptrones multicapa se entrenan por medio del algoritmo de Retropropagación. El procedimiento se basa en realizar dos pasadas sobre las diferentes capas de la red, una hacia delante y la otra hacia atrás. En la pasada hacia delante, el vector de entrada (también denominado *señal de función* o simplemente *señal de entrada*) se aplica a los nodos de la red, capa a capa, hasta obtener la salida real de la red. Durante esta pasada, los pesos de la red permanecen fijos. Sin embargo, durante la pasada hacia atrás, los pesos se van ajustando según la regla de *corrección del error*, que se basa en calcular la diferencia entre la salida deseada y la salida real de la red. Esta diferencia se conoce como *señal de error* $\varepsilon_j(k) = y_j(k) - o_j^N(k)$, y es lo que se va propagando desde la capa de salida hasta la capa de entrada, ajustando los pesos de cada conexión entre nodos de manera que la respuesta real de la red se corrija aproximándose estadísticamente hacia la respuesta deseada. La señal de error se evalúa por la denominada función de coste, que suele ser el error cuadrático, como en el perceptrón monocapa. De hecho, el algoritmo de Retropropagación es un algoritmo secuencial de gradiente, de forma que la expresión de actualización de los pesos de la red se puede considerar una particularización de la expresión 4.1, quedando:

$$w_{ji}^{(n)}(k+1) = w_{ji}^{(n)}(k) - \eta^{(n)} \frac{\partial C(\mathbf{w})}{\partial w_{ji}^{(n)}} \quad (4.14)$$

Donde:

- $\eta^{(n)}$: Paso de adaptación de la capa n
- k: Orden de iteración. Se corresponderá con la muestra k-ésima.
- $C(\mathbf{w})$: Función de coste. Caso de ser el error cuadrático:

$$C(\mathbf{w}) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N (y_j(k) - o_j^N(k))^2 \quad (4.15)$$

- N: Número de neuronas de la capa de salida (capa N)
- $y_j(k)$: Componente j-ésima de la salida final correspondiente a la muestra k-ésima

Aplicando la regla de la cadena, se puede calcular el gradiente del coste para cada peso de cada neurona de cada capa como:

$$\frac{\partial C(\mathbf{w})}{\partial w_{ji}^{(n)}} = \frac{\partial C(\mathbf{w})}{\partial o_j^{(n)}} \frac{\partial o_j^{(n)}}{\partial w_{ji}^{(n)}} = \frac{\partial C(\mathbf{w})}{\partial o_j^{(n)}} o_i^{(n-1)} \cdot f_j'^{(n)}(o_j^{(n)}) \quad (4.16)$$

Si denominamos $\Delta_j^n = -\frac{\partial C(\mathbf{w})}{\partial o_j^{(n)}} f_j'^{(n)}(o_j^{(n)})$, tenemos:

$$w_{ji}^{(n)}(k+1) = w_{ji}^{(n)}(k) + \eta^{(n)} \Delta_j^n(k) o_i^{(n-1)}(k) \quad (4.17)$$

La actualización de pesos expresada de este modo se denomina habitualmente *Regla Delta Generalizada*. La función de activación $f_j^{(n)}$ es una tangente hiperbólica o una sigmoide, al igual que en los perceptrones monocapa, por lo que sus derivadas son sencillas de calcular, tal como hemos visto.

A continuación describimos los pasos esenciales involucrados en la ejecución del algoritmo de Retropropagación:

1. Inicialización de los coeficientes. Los pesos se suelen inicializar aleatoriamente, con distribución normal de media cero y varianza tal que la desviación típica asociada haga que la salida de la función de activación se encuentre sobre la transición entre la zona lineal y las saturadas. Las zonas saturadas son las partes de la curva en las que la salida de la función apenas varía ante incrementos o reducciones significativas de la entrada.

2. Presentación de las muestras de entrenamiento. El conjunto de muestras de entrenamiento se ordena y se presenta de forma secuencial, realizando las pasadas hacia delante y hacia atrás para cada muestra, tal como se describe en los pasos 3 y 4.
3. Propagación hacia delante. Aplicar la k-ésima muestra seleccionada a la entrada de la red y obtener la salida de cada neurona, capa a capa, hasta obtener la salida final $o_j^{(N)}(k)$ (suponiendo que la red tiene N capas). Calcular después la señal de error dada como $\varepsilon_j(k) = y_j(k) - o_j^{(N)}(k)$.
4. Propagación hacia atrás. Calcular los gradientes locales $\Delta_j^n(k)$ desde las neuronas de la capa de salida hasta las neuronas de la primera capa oculta como:

$$\Delta_j^n(k) = \begin{cases} \varepsilon_j(k) \cdot f_j^{(N)}(o_j^{(N)}(k)) & \text{para capa de salida (N)} \\ f_j^{(n)}(o_j^{(n)}(k)) \sum_m \Delta_m^{n+1}(k) \cdot w_{mj}^{n+1}(k) & \text{para capa oculta (n)} \end{cases} \quad (4.18)$$

Y actualizar en cada caso los coeficientes según la expresión 4.17. También es común incluir un término de momento en el cálculo de los coeficientes, dado por una constante $\alpha \in (0, 1)$. Este término pondera al valor del coeficiente obtenido en la iteración anterior, proporcionando cierta inercia al cambio. En este caso, la expresión quedaría:

$$w_{ji}^{(n)}(k+1) = w_{ji}^{(n)}(k) + \alpha \cdot w_{ji}^{(n)}(k-1) + \eta^{(n)} \Delta_j^n(k) o_i^{(n-1)}(k) \quad (4.19)$$

5. Vuelta al paso 2. Mientras no se alcance el criterio de parada, se realizan nuevos ciclos de presentación de las muestras, cambiando el orden de presentación en cada ciclo.

En cuanto al criterio de parada, existen varias alternativas. Un criterio habitual es establecer un número máximo de ciclos de presentación de todas las muestras de entrenamiento. Otro complementario al anterior y muy común consiste en dividir las muestras disponibles en dos conjuntos. Por un lado tenemos el conjunto de *muestras de*

entrenamiento, que sirve para calcular los valores de los coeficientes tal como hemos expuesto, y por otro el conjunto de *muestras de validación o detención*, que se utiliza para evaluar la capacidad de generalización de la red. Tras cada ciclo de presentación de las muestras de entrenamiento, se evalúa también el coste para las muestras de validación. Se puede observar que antes de llegar al mínimo coste en el conjunto de muestras de entrenamiento, repunta el coste para las muestras de validación. En este caso se dice que la red presenta sobreajuste sobre los datos de entrenamiento y conviene detener el proceso, para no perder capacidad de generalización. Ilustramos este efecto en la siguiente figura.

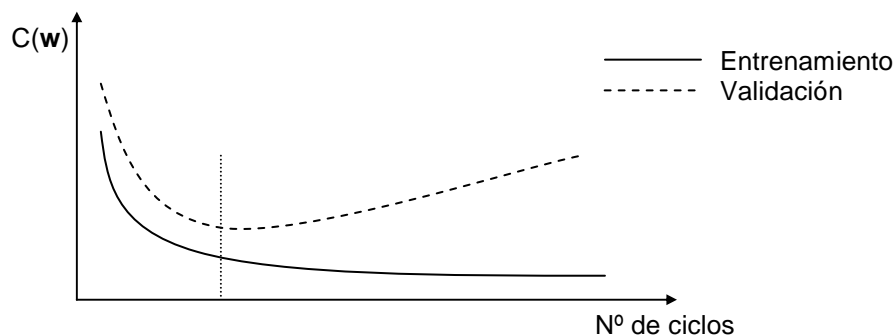


Figura 4.6 Efecto de sobreajuste a las muestras de entrenamiento

Por último, cabe indicar que el paso de adaptación $\eta^{(n)}$ suele ir reduciéndose conforme avanzan los ciclos.

4.2.4. Procesos Gaussianos

A la hora de aplicar técnicas de aprendizaje supervisado para resolver un problema de predicción como el nuestro, existen dos enfoques fundamentales. Por un lado, se puede suponer que la relación entre la entrada \mathbf{x} y la salida y se rige por una clase específica de funciones; este es el caso de la regresión lineal que vimos al comienzo del punto 4.2. Al asumir una relación lineal entre la variable dependiente y las variables independientes, se simplifica el proceso de entrenamiento (al poder realizarse por mínimos cuadrados) pero se está obviando parte de la información incluida en los datos de partida, ya que en general esa relación no será lineal.

El segundo enfoque consiste en emplear una formulación lo suficientemente general de forma que sean los propios datos de entrenamiento los que ayuden a modelar la relación entre la entrada y la salida. Este segundo planteamiento es en el que se apoyan los procesos gaussianos.

Se puede definir un proceso gaussiano como un conjunto de variables aleatorias con la propiedad de que la distribución conjunta de cualquier subconjunto finito de esas variables sigue una distribución gaussiana [Ras+06], [Ebd08], [Mac06]. La gran utilidad de los procesos gaussianos reside en que se puede suponer que cualquier conjunto de datos arbitrario $\mathbf{y} = \{y_1, \dots, y_n\}$ sigue una distribución gaussiana. Un proceso gaussiano es por tanto una generalización de la función de distribución de probabilidad gaussiana, con la salvedad de que no se trabaja con variables aleatorias (escalares o vectores), sino con funciones, como veremos seguidamente.

Un proceso gaussiano queda completamente definido por su media y su covarianza. Definimos la función media $m(\mathbf{x})$ y la función covarianza $k(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ de un proceso real $f(\mathbf{x})$ como:

$$\begin{aligned} m(\mathbf{x}) &= E[f(\mathbf{x})], \\ k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') &= E[(f(\mathbf{x}) - m(\mathbf{x}))(f(\mathbf{x}') - m(\mathbf{x}'))] \end{aligned} \quad (4.20)$$

Donde \mathbf{x} y \mathbf{x}' son observaciones (vectores de entrada) que se encuentran en el conjunto de entrenamiento. Así, expresamos el proceso gaussiano como:

$$f(\mathbf{x}) \rightarrow GP(m(\mathbf{x}), k(\mathbf{x}, \mathbf{x}')) \quad (4.21)$$

Normalmente se considera que la función media es nula para cualquier componente de cualquier vector de entrada, si bien no esto no es estrictamente necesario. De este modo, la relación entre cada par de observaciones suele venir dada únicamente por la función de covarianza, por lo que es el elemento determinante a la hora de modelar la función entre las entradas y la salida de la herramienta de predicción.

Es lógico pensar que en general no será válida como función de covarianza cualquier función de las entradas \mathbf{x} y \mathbf{x}' . Una elección muy popular es la función Exponencial Cuadrada, dada como:

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \sigma_f^2 \exp\left[-\frac{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^2}{2L^2}\right] \quad (4.22)$$

Donde el término σ_f^2 representa la máxima covarianza posible, por lo que su valor dependerá de la variabilidad de la salida, debiendo ser mayor cuanto mas varíe y . Por otra parte, si \mathbf{x} está muy próxima a \mathbf{x}' entonces $k(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ se aproxima a su máximo, lo cual significa que $f(\mathbf{x})$ y $f(\mathbf{x}')$ están muy correladas; esto es positivo si se desea una función de salida suave. Por el contrario, si \mathbf{x} y \mathbf{x}' están muy distanciadas, tendremos que $k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \approx 0$. El efecto de esta separación depende del valor del parámetro de longitud L , el cual proporciona flexibilidad a la función de covarianza Exponencial Cuadrada.

En ciertas ocasiones los datos de partida pueden incluir una componente aleatoria de tipo ruidoso, que deberá ser tomada en consideración. Este es nuestro caso, ya que el tráfico de terminación tiene ciertamente una componente puramente aleatoria debida a las características de uso del servicio telefónico móvil, tal como indicamos en el capítulo 3. Análogamente a la regresión lineal vista al principio del capítulo, resulta conveniente suponer que cada observación y se relaciona con la función subyacente $f(\mathbf{x})$ a través de un modelo de ruido gaussiano, de media nula y varianza constante para cada observación:

$$y = f(\mathbf{x}) + N(\mathbf{0}, \sigma_n^2) \quad (4.23)$$

Podemos incluir el término de ruido gaussiano en la expresión de la función covarianza por medio de la función delta de Kronecker, $\delta(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$:

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \sigma_f^2 \exp\left[-\frac{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^2}{2L^2}\right] + \sigma_n^2 \delta(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \quad (4.24)$$

Ahora estamos ya en disposición de describir las acciones implicadas en la predicción basada en procesos gaussianos. En primer lugar, es necesario calcular la función de covarianza entre los tres tipos de entradas implicadas en el proceso, lo cual da lugar a tres matrices diferentes. Por un lado tenemos la matriz de covarianzas de las entradas de los datos de entrenamiento, que denotamos como K :

$$K = \begin{bmatrix} k(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_1) & k(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) & \cdots & k(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_n) \\ k(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_1) & k(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_2) & \cdots & k(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_1) & k(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_2) & \cdots & k(\mathbf{x}_n, \mathbf{x}_n) \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

La única restricción que tiene la matriz K es que está definida positiva; cabe indicar que los elementos de la diagonal de K son $\sigma_f^2 + \sigma_n^2$. En segundo lugar tenemos las covarianzas de cada nueva entrada \mathbf{x}^* con cada una de las entradas del conjunto de datos de entrenamiento, dando lugar a K^* :

$$K^* = [k(\mathbf{x}^*, \mathbf{x}_1) \quad k(\mathbf{x}^*, \mathbf{x}_2) \quad \cdots \quad k(\mathbf{x}^*, \mathbf{x}_n)] \quad (4.26)$$

Y por último tenemos la autocovarianza de cada nueva entrada \mathbf{x}^* , que denotamos por K^{**} :

$$K^{**} = k(\mathbf{x}^*, \mathbf{x}^*) \quad (4.27)$$

El siguiente paso se basa en suponer que nuestras observaciones forman parte de una distribución gaussiana multidimensional, en cuyo caso podemos escribir:

$$\begin{bmatrix} y \\ y^* \end{bmatrix} \rightarrow N\left(\mathbf{0}, \begin{bmatrix} K & K^{*T} \\ K^* & K^{**} \end{bmatrix}\right) \quad (4.28)$$

Nuestro objetivo es obtener la predicción y^* a partir de los datos de entrenamiento, lo cual se representa por la probabilidad condicionada $p(y^* | y)$. Se puede demostrar que $y^* | y$ sigue una distribución gaussiana de la forma:

$$y | y^* \rightarrow N(K^* K^{-1} y, K^{**} - K^* K^{-1} K^{*T}) \quad (4.29)$$

La mejor estimación de y^* es la media de la distribución, que viene dada como:

$$\bar{y}^* = K^* K^{-1} y \quad (4.30)$$

Y la incertidumbre en nuestra estimación queda reflejada en su varianza:

$$\text{var}(y^*) = K^{**} - K^* K^{-1} K^{*T} \quad (4.31)$$

Como hemos visto, la fiabilidad de nuestra predicción depende totalmente de la buena selección de la función de covarianza. Además, el resultado puede ser inaceptable si los parámetros libres de la función no son seleccionados convenientemente, por lo que en general deberán ser estimados

y optimizados [Ras+06]. Estos parámetros libres o *hiperparámetros* se suelen denominar en su conjunto como θ (por ejemplo, $\theta = \{L, \sigma_f^2 \text{ y } \sigma_n^2\}$ para la exponencial cuadrada). Asumiendo que se dispone de cierto conocimiento de cómo debería ser θ , se puede utilizar el estimador de máximo a posteriori, MAP, el cual maximiza $p(\theta | \mathbf{x}, y)$. Aplicando el teorema de Bayes, se tiene que esto equivale a maximizar $\log p(y | \mathbf{x}, \theta)$:

$$\log p(y | \mathbf{x}, \theta) = -\frac{1}{2} y^T K^{-1} y - \frac{1}{2} \log |K| - \frac{n}{2} \log 2\pi \quad (4.32)$$

Una vez obtenida esta expresión para los hiperparámetros, basta con aplicar un algoritmo de optimización estándar (p. e., un algoritmo de gradiente) para obtener sus valores apropiados.

Las funciones de covarianza pueden ser diseñadas de modo que permitan reflejar toda la complejidad de cada problema a resolver. La clave por tanto radica en seleccionar o construir convenientemente los términos de la función. Por ejemplo, si la variable dependiente presentase variaciones a largo plazo junto con variaciones periódicas, podría incluirse un término de exponencial cuadrada junto con un término sinusoidal para modelar respectivamente cada uno de esos fenómenos. La función de covarianza así construida tendría una expresión como la siguiente:

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \sigma_f^2 \exp\left[\frac{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^2}{2L^2}\right] + \exp[-2\text{sen}^2[\pi f(\mathbf{x} - \mathbf{x}')]] + \sigma_n^2 \delta(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \quad (4.33)$$

En la expresión, el término en seno al cuadrado tiene asociado una frecuencia f , de modo que la función de covarianza mantendrá cierto peso incluso para valores de \mathbf{x} y \mathbf{x}' muy distantes, siempre que $f(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \approx n + \frac{1}{2}$, con $n = 0, 1, 2, \dots$. También puede resultar útil añadir a la función de covarianza un término constante σ_c , o incluso un término lineal, dependiendo de las características de la variable dependiente a predecir. En este caso la función quedaría como:

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{x}') = \sigma_f^2 \exp\left[\frac{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^2}{2L^2}\right] + \exp[-2\text{sen}^2[\pi f(\mathbf{x} - \mathbf{x}')]] + \sigma_n^2 \delta(\mathbf{x}, \mathbf{x}') + \mathbf{x}^T \Lambda^{-1} \mathbf{x}' + \sigma_c \quad (4.34)$$

Donde el término Λ^{-1} representa una matriz diagonal de hiperparámetros que permiten ponderar el peso de cada componente en el término $\mathbf{x}^T \mathbf{x}'$.

Como vemos, la posibilidad de añadir tantos términos a la función de covarianza como sean necesarios proporciona a los procesos gaussianos la capacidad expresiva necesaria para modelar problemas de gran complejidad.

Tal como se estudió en el capítulo 3, el tráfico de terminación de voz presenta fenómenos de periodicidad, estacionalidad y tendencia, los cuales se representarán en el próximo capítulo por el conjunto de variables temporales relevantes que ya vimos (fecha, el día de la semana, indicador de festivo, día del año y semana del año). Dadas las prestaciones que ofrecen para modelar diferentes regímenes de variaciones en la salida a predecir, los procesos gaussianos se presentan como una solución muy apropiada para modelar el tráfico de terminación de voz. Según se verá en el próximo capítulo, el número de funciones de covarianza que se deberá emplear será reducido, consiguiendo la suficiente capacidad expresiva en el sistema de predicción y manteniendo la complejidad y el coste computacional en límites muy razonables.

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTACIÓN DE LAS SOLUCIONES

En los capítulos 2 y 3 se ha descrito en detalle el escenario de negocio en que se desarrolla el servicio de terminación de voz, mientras que en el capítulo 4 se han establecido los fundamentos teóricos de las técnicas de tratamiento digital de la información susceptibles de ser empleadas en el proceso de maximización de los ingresos asociados a este servicio. En este capítulo vamos a exponer cómo se han implementado estas soluciones dentro del escenario de negocio planteado.

Contenido del capítulo

El primer apartado describe cómo se ha generado el tráfico de terminación del operador ficticio UC3MOVIL que planteamos en el caso de negocio descrito en el capítulo 3. Esta descripción se presenta por medio de tres puntos.

- Generación del volumen de tráfico. Se explica el procedimiento seguido para distribuir los minutos de tráfico de terminación asignados al

operador, desde el momento de su lanzamiento al mercado hasta el final del periodo bajo estudio. Para ello, se han seguido los patrones de tráfico descritos en el capítulo 3, con el objeto de plasmar los fenómenos de periodicidad, estacionalidad y tendencia que caracterizan al tráfico de terminación de voz.

- Determinación del número y duración de las llamadas. Se expone la manera en que se ha establecido la cantidad de llamadas y su duración. Se ha considerado que la duración sigue una distribución exponencial, con un valor medio que varía en función de la hora del día.
- Cuantificación de variables temporales independientes. Confección de muestras. Se describe como se han asignado los valores numéricos a las variables temporales empleadas.

En el segundo apartado se describen los métodos de predicción que se han implementado, así como los resultados que han obtenido. Además, se analiza el efecto de las variables independientes en la predicción.

- Regresión lineal. Las pruebas que se exponen demuestran que esta técnica carece de la capacidad expresiva necesaria para modelar el tráfico de terminación.
- Perceptrón multicapa. Sus resultados confirman que se trata de una técnica válida para el modelado, ya que es capaz de reproducir los perfiles de tráfico fundamentales.
- Proceso gaussiano. Se concluye que es la alternativa más adecuada para la predicción, ya que ofrece la capacidad expresiva necesaria con una mayor robustez que el perceptrón multicapa.
- Efecto de las variables temporales independientes en la reducción del error. En este punto adicional se demuestra que todas las variables independientes empleadas son relevantes de cara a la predicción del tráfico.

El último apartado detalla el sistema de optimización de las tarifas nominales. La descripción se realiza a través de tres puntos.

- Implementación del algoritmo evolutivo. Se muestran paso a paso las particularizaciones realizadas para adecuar el algoritmo al problema en cuestión.
- Pruebas de funcionamiento. Se describen las pruebas efectuadas, de las que se concluye que el procedimiento conduce a la maximización de los ingresos por tráfico de terminación de voz.
- Valoración de resultados. Se concluye que el empleo del procedimiento diseñado tiene un efecto directo y notable sobre las cuentas globales del operador móvil, ya que proporciona un aumento de ingresos muy notable.

5.1. MODELADO DE TRÁFICO DE TERMINACIÓN

En el capítulo 3 vimos que la variación del tráfico de terminación de voz dependía de factores económicos, sociales y comerciales. También vimos cómo estos factores se traducen en fenómenos de periodicidad, estacionalidad y tendencia, los cuales pueden ser representados de forma natural y directa por medio de variables temporales. En los siguientes puntos explicaremos la forma en que se han plasmado estos fenómenos en el modelado del tráfico de terminación de voz del operador móvil ficticio UC3MOVIL, descrito en el capítulo 3 como caso práctico. El tráfico modelado está formado por un histórico de datos aleatorios modulados por unos perfiles específicos.

5.1.1. Generación del volumen de tráfico

Seguidamente describiremos como hemos generado el volumen de tráfico de terminación de nuestro operador. Dependiendo del contexto, lo podremos expresar tanto en minutos como en segundos.

En el capítulo 3 indicábamos que la fecha de lanzamiento al mercado asignada a UC3MOVIL fue el 1 de octubre de 2005, y que el periodo a analizar iba desde el 16 de octubre de 2008 hasta el 15 de abril de 2009. De esta forma, se ha generado un volumen de tráfico específico para cada una de las 24 horas de un total de 1293 días. Cabe aclarar que el tráfico generado para los últimos

182 días servirá para evaluar la bondad de los procedimientos de predicción y optimización que se expondrán en los apartados 5.2 y 5.3 respectivamente.

Para facilitar la descripción de los procedimientos de predicción y optimización, no se ha diferenciado por operador de origen. Se evita así tener que repetir tanto el procedimiento de generación de tráfico como las predicciones tantas veces como grupos de operadores se considerasen (la CMT propuso inicialmente cuatro grupos de operadores). Además se simplifica el cálculo de los ponderadores de tráfico; todo esto sin restar validez a los procedimientos empleados.

La generación del tráfico se ha realizado aplicando diferentes perfiles, siguiendo los siguientes pasos:

1. Perfil horario. Se ha asignado una cantidad de tráfico para cada hora de cada día de la semana, según los perfiles de tráfico descritos por Heegaard [Hee07], y que ya adelantamos en el capítulo 3:

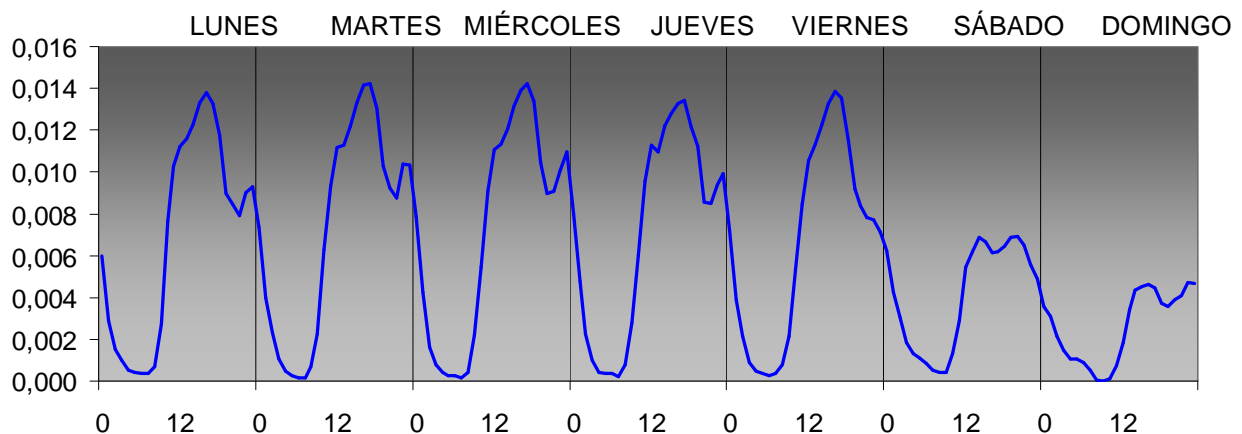


Figura 5.1 Perfil horario asignado a UC3MOVIL a lo largo de una semana [Hee07]

El tráfico de cada semana está normalizado, de modo que la suma del tráfico semanal es la unidad. Esta estructura se repite semana a semana, hasta completar los 1293 días del estudio. De esta forma hemos impreso las características de periodicidad respecto de la hora del día y del día de la semana que aparecen en el tráfico de terminación de un operador móvil.

2. Festivos. Tal como adelantamos en el capítulo 3, el perfil de tráfico de terminación de voz varía en los días festivos. En este sentido, indicábamos que el perfil de tráfico en un día festivo es similar al perfil de tráfico de un domingo. Teniendo en cuenta esto, hemos modelado el perfil de tráfico de cada día festivo, hora a hora, como la suma ponderada del perfil de tráfico de un domingo más el perfil de tráfico del día de la semana en que se produce la festividad en cuestión:

$$\text{Festivo} = \alpha \cdot \text{Domingo} + (1 - \alpha) \cdot \text{Día_de_la_semana} \quad (5.1)$$

El coeficiente de ponderación α indica la porción de la población española que celebra la festividad a modelar. Hemos considerado tres ámbitos de festividad: nacional, autonómica y local, de modo que para festivos nacionales, $\alpha = 1$, mientras que para las festividades autonómicas y locales, $0 < \alpha < 1$.

Hay que señalar que sólo se han tenido en cuenta las festividades locales de las capitales de provincia con población mayor al 0,5% de la población total en España. Como sabemos, el tráfico de terminación de voz tiene componente aleatoria, por lo que el efecto de la festividad en localidades de población inferior al 0,5% queda absolutamente enmascarado por el efecto de la aleatoriedad del tráfico.

Las fechas de las festividades se han obtenido a partir de los correspondientes Boletines Oficiales [34], [35], [36], [37], [38], mientras que el coeficiente de cada festividad se ha obtenido a partir de los datos de población disponibles en la página web del Instituto Nacional de Estadística, INE [39], en cada año considerado en nuestro estudio (2005 – 2009).

El porcentaje de población de cada Comunidad Autónoma aparece reflejado en la tabla 5.1, mientras que el correspondiente a cada una de las capitales de provincia con población mayor al 0,5% se recoge en la tabla 5.2.

	2009	2008	2007	2006	2005
Andalucía	17,76%	17,80%	17,83%	17,84%	17,80%
Aragón	2,88%	2,87%	2,87%	2,86%	2,88%
Asturias	2,32%	2,35%	2,38%	2,41%	2,44%
Balears (Illes)	2,34%	2,31%	2,28%	2,24%	2,23%
Canarias	4,50%	4,49%	4,48%	4,46%	4,46%
Cantabria	1,26%	1,26%	1,27%	1,27%	1,27%
Castilla y León	5,48%	5,54%	5,59%	5,64%	5,69%
Castilla - La Mancha	4,45%	4,41%	4,37%	4,32%	4,30%
Cataluña	15,99%	15,97%	15,95%	15,96%	15,86%
Comunitat Valenciana	10,90%	10,85%	10,81%	10,75%	10,64%
Extremadura	2,36%	2,38%	2,41%	2,43%	2,46%
Galicia	5,98%	6,06%	6,13%	6,19%	6,26%
Madrid (Comunidad de)	13,66%	13,56%	13,45%	13,44%	13,52%
Murcia (Región de)	3,09%	3,09%	3,08%	3,06%	3,03%
Navarra (Comunidad Foral de)	1,35%	1,34%	1,34%	1,35%	1,35%
País Vasco	4,65%	4,69%	4,74%	4,77%	4,82%
Rioja (La)	0,69%	0,69%	0,68%	0,69%	0,68%

Tabla 5.1 Porcentaje de población por Comunidad Autónoma

	2009	2008	2007	2006	2005
Córdoba	0,703%	0,709%	0,716%	0,722%	0,728%
Granada	0,501%	0,512%	0,523%	0,532%	0,537%
Málaga	1,216%	1,228%	1,242%	1,254%	1,266%
Sevilla	1,504%	1,525%	1,547%	1,576%	1,596%
Zaragoza	1,443%	1,441%	1,440%	1,452%	1,468%
Palma de Mallorca	0,858%	0,853%	0,848%	0,839%	0,852%
Las Palmas de Gran Canaria	0,817%	0,826%	0,835%	0,843%	0,858%
Valladolid	0,680%	0,690%	0,700%	0,716%	0,728%
Barcelona	3,469%	3,498%	3,529%	3,591%	3,612%
A Coruña	0,526%	0,533%	0,541%	0,544%	0,552%
Madrid	6,965%	6,948%	6,930%	6,998%	7,154%
Murcia	0,935%	0,935%	0,936%	0,933%	0,929%
Vitoria-Gasteiz	0,504%	0,506%	0,508%	0,509%	0,513%
Bilbao	0,759%	0,772%	0,786%	0,792%	0,801%
Alicante/Alacant	0,716%	0,715%	0,714%	0,721%	0,724%
Valencia	1,742%	1,771%	1,801%	1,801%	1,806%

Tabla 5.2 Porcentaje de población de capitales de provincia con población mayor al 0,5%

En la figura 5.2 se ilustra un ejemplo del modelado llevado a cabo para los festivos. Se representa el perfil de tráfico modelado para el Jueves 19 de marzo de 2009, que resultó festivo para el 50,26% de la población (Comunidades Autónomas de Castilla-León, Castilla-La Mancha, Comunidad Valenciana, Galicia, Madrid, Murcia, Navarra,

País Vasco y La Rioja). Como se puede apreciar, el perfil de tráfico generado es el resultado de combinar los perfiles de un domingo genérico con el de un jueves genérico.

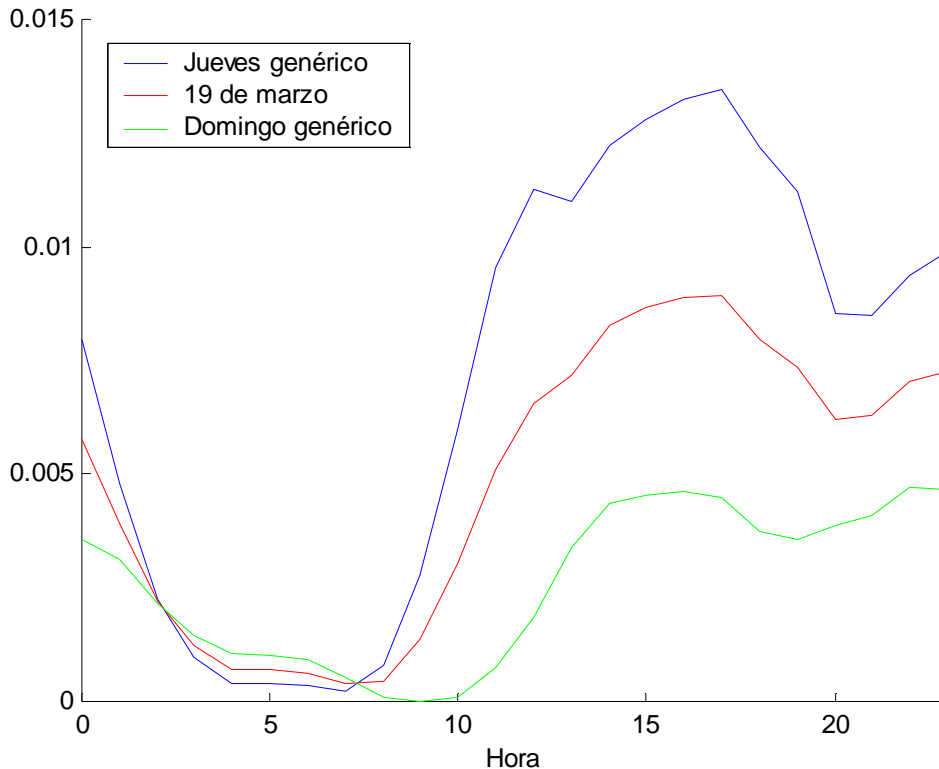


Figura 5.2 Ejemplo de modelado de festivos (19 de marzo de 2009)

Cabe indicar que en el periodo analizado de 1293 días, hay un total de 244 festivos, con un promedio del 19,4% de la población celebrando cada festivo.

3. Tendencia y aleatoriedad. Para representar el fenómeno de la tendencia, hemos considerado que la cuota de mercado de nuestro operador era del 1,5% al final del segundo trimestre de 2009 y que había crecido a un ritmo lineal trimestral del 0,1% respecto del total del mercado, tal como adelantábamos en el capítulo 3.

El volumen de tráfico resultante para cada trimestre se ha repartido entre los días que lo constituyen, asignando una variación lineal para cada día.

Una vez aplicada la tendencia, y el efecto de los festivos, resulta conveniente incorporar la componente aleatoria inherente al tráfico de terminación. Para ello, se ha añadido la salida de una distribución gaussiana de media nula y desviación del 5% al tráfico de cada una de las 24 horas de cada uno de los 1293 días modelados.

4. Estacionalidad. Tal como indicábamos en el capítulo 3, la estacionalidad del tráfico de terminación está muy marcada por el comportamiento de la actividad comercial, lo cual se traduce en variaciones del volumen de tráfico en ciertas épocas del año (efectos “Campaña de Navidad”, “Cuesta de Enero”, “Campaña de Verano” y “Cerrado por Vacaciones”). Para modelar estos efectos, hemos provocado variaciones en el perfil de tráfico en días concretos de determinadas semanas del año. Esta medida, sin dejar de tener arbitrariedad, permite reflejar el comportamiento de la actividad comercial de cada época del año con cierta fidelidad. Las variaciones que a continuación describimos se han aplicado día a día, respecto del perfil obtenido tras aplicar la tendencia. Además, para incorporar la necesaria componente aleatoria, se ha añadido la salida de una distribución gaussiana de media nula y desviación del 5% del perfil de cada día, afectando por igual a las 24 horas que lo forman.

En la siguiente figura mostramos el perfil de estacionalidad generado. En la parte superior tenemos el perfil definitivo, mientras que en la parte inferior lo mostramos sin componente aleatoria.

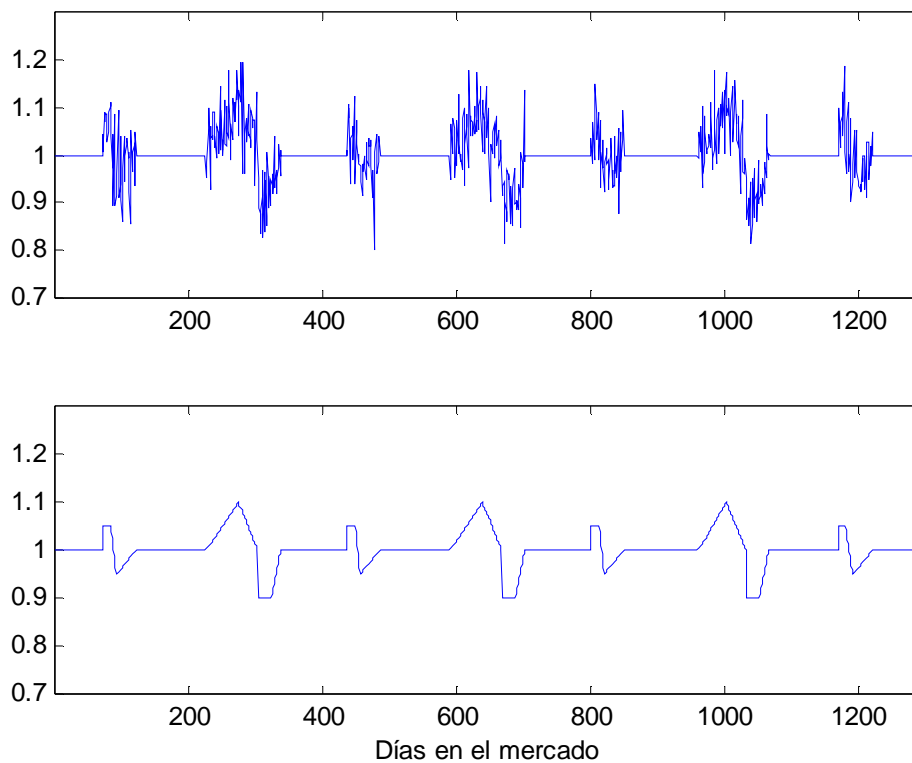


Figura 5.3 Perfil de estacionalidad de UC3MOVIL

Para modelar el efecto de la Campaña de Navidad, incrementamos el perfil de tráfico en un 5% en el periodo que va desde el lunes siguiente al puente de la Constitución hasta el día de Nochebuena.

El efecto de la Cuesta de Enero lo modelamos es dos tramos. En primer lugar, reducimos linealmente el perfil de tráfico desde Nochebuena hasta el domingo del último fin de semana del año, hasta dejarlo en un 5% menos del perfil previo. En segundo lugar, incrementamos linealmente el perfil hasta el último domingo de enero, donde se termina de recuperar el perfil previo.

La Campaña de Verano también se ha modelado es dos tramos. En el primero, aumentamos linealmente el perfil de tráfico desde el lunes de la tercera semana de mayo hasta el domingo del último fin de semana de junio, dejándolo un 10% por encima del perfil previo. En segundo lugar, reducimos linealmente el perfil hasta el último domingo de julio, donde se termina de recuperar el perfil previo.

Para modelar el efecto Cerrado por Vacaciones, reducimos en un 10% el perfil de tráfico desde el lunes de la primera semana de agosto hasta el domingo de la tercera semana de ese mes. Después incrementamos linealmente el perfil hasta el último domingo de septiembre, donde se termina de recuperar el perfil previo.

5. Normalización y asignación de volumen total. Este es el último paso realizado. Primero se ajustó el volumen total de tráfico, ya que del último trimestre sólo se necesitaban los 15 primeros días. Después se normalizó el perfil resultante de aplicar la estacionalidad y se multiplicó por el volumen total, dando lugar al perfil de tráfico definitivo.

En la siguiente figura se muestra el perfil diario obtenido, en la que se aprecian claramente los fenómenos de tendencia y estacionalidad característicos del tráfico de terminación de un operador móvil.

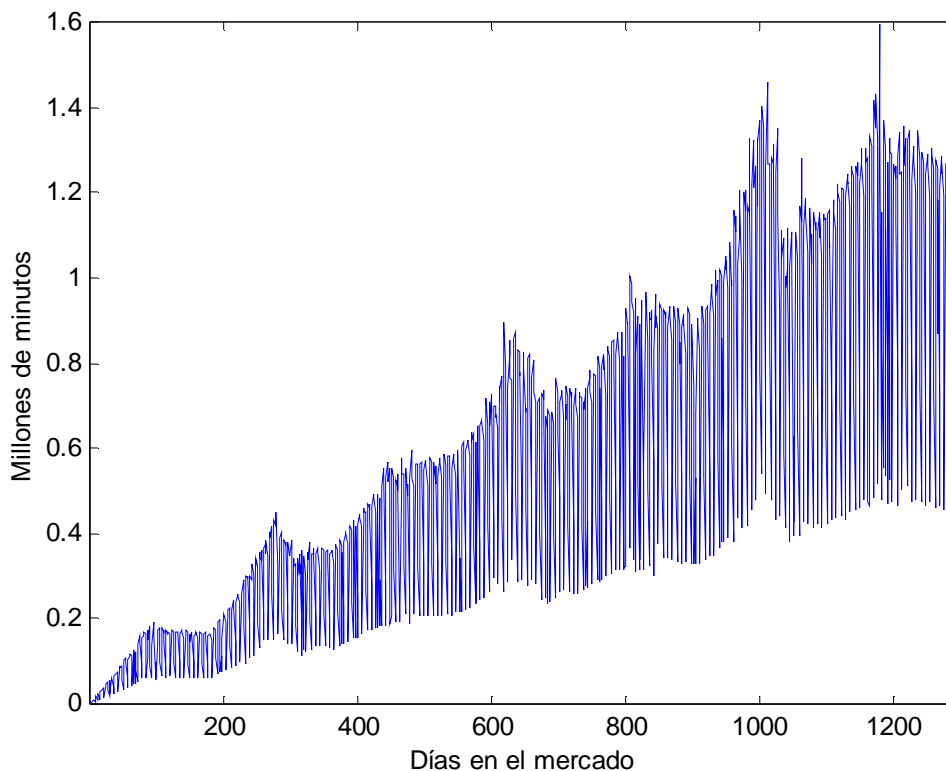


Figura 5.4 Evolución del volumen de tráfico diario de UC3MOVIL

La periodicidad diaria, horaria y semana a semana, junto con el efecto de los festivos, se aprecian en la figura 5.5. Aquí hemos representado el tráfico de UC3MOVIL, hora a hora, desde el 16 de marzo (lunes) al 29 de marzo de 2009 (domingo). El cuarto día es el 19 de marzo, que fue festivo en el 50,25% de la población; se aprecia perfectamente como el tráfico es muy inferior al del día anterior y al del jueves de la semana siguiente.

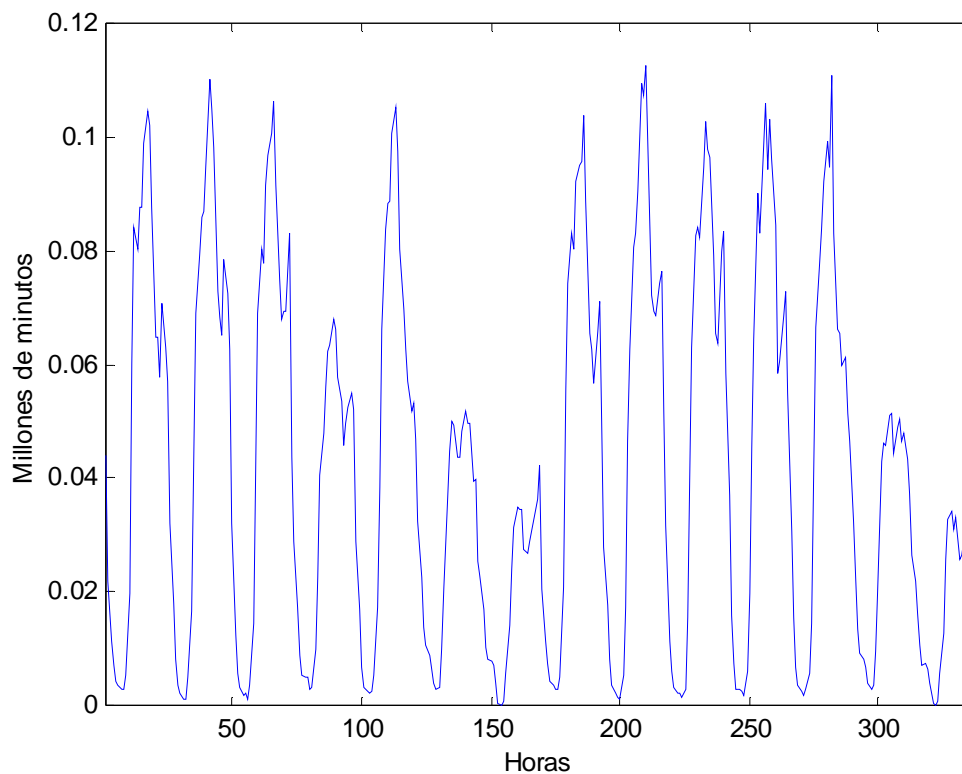


Figura 5.5 Tráfico Horario de UC3MOVIL del 16 al 29 de marzo de 2009

Por último, en la figura 5.6 se representa el detalle horario del tráfico de UC3MOVIL de la semana que va del 23 al 29 de marzo. En esta figura se aprecia aún mejor la periodicidad diaria y horaria, y se distingue perfectamente el carácter aleatorio aplicado a los datos

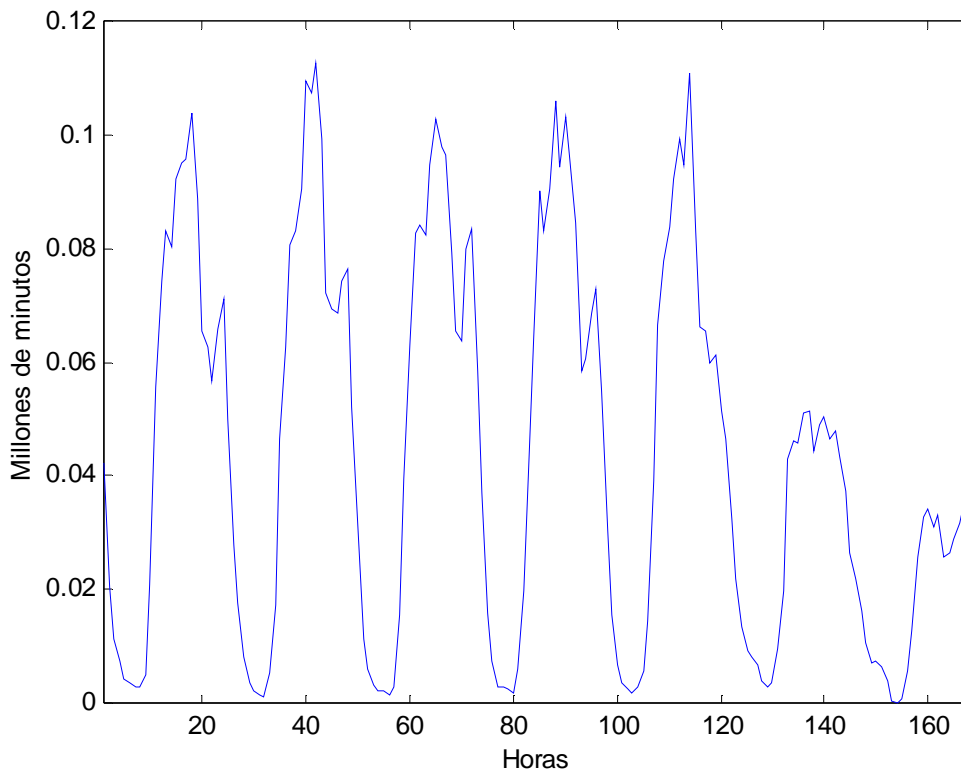


Figura 5.6 Tráfico Horario de UC3MOVIL del 23 al 29 de marzo de 2009

5.1.2. Determinación del número y duración de las llamadas

En el punto anterior hemos especificado los pasos seguidos para modelar el volumen de tráfico de terminación de nuestro operador ficticio UC3MOVIL. Para la caracterización completa del tráfico del operador es necesario modelar otros dos elementos fundamentales, que son el número de las llamadas y su duración.

Recordando los esquemas de tarificación expuestos en el capítulo 3, vemos que es imprescindible conocer la duración de cada llamada, ya que cualquiera de los esquemas considerados se basa en la tarificación por tiempo. Además, la determinación de la intensidad de tráfico es absolutamente necesaria, tanto cuando se emplea un esquema con establecimiento de llamada como cuando se utiliza un periodo de franquicia. Cuando se utiliza un esquema con establecimiento se factura un importe fijo por cada llamada, independientemente de la duración de la misma. Por otra parte, en los esquemas con periodo de franquicia, además es necesario determinar el número y la duración concreta de las llamadas de duración menor o igual al

periodo de franquicia, ya que durante este intervalo de tiempo el precio de la llamada es fijo.

Para modelar tanto el número de llamadas como su duración debemos tener en cuenta el volumen de tráfico en cada hora obtenido en el punto anterior. De esta forma, debemos repartir el tráfico de cada hora entre un número variable de llamadas de duración también variable. En diferentes publicaciones [Hee07], [Ive05] y recomendaciones de la ITU – T [16], [17] se indica que la duración de las llamadas suele modelarse según una distribución exponencial con una duración media que depende de la hora del día. Este enfoque nos resulta muy útil, ya que nuestro dato de partida es la duración acumulada de todas las llamadas en cada hora, por lo que sólo quedaría por determinar la duración media por llamada en cada hora para poder efectuar el modelado.

En su publicación sobre patrones de tráfico telefónico [Hee07], Heegaard presenta varias curvas con la duración media de la llamada en función de la hora del día y del tipo de red de origen y destino, para redes noruegas. Con esta información de partida, hemos generado la curva de duración media de la llamada a lo largo del día para nuestro operador UC3MOVIL como promedio de las curvas que consideran las llamadas con destino a redes móviles, ya que son las que representan el tráfico de terminación. La presentamos en la siguiente figura.

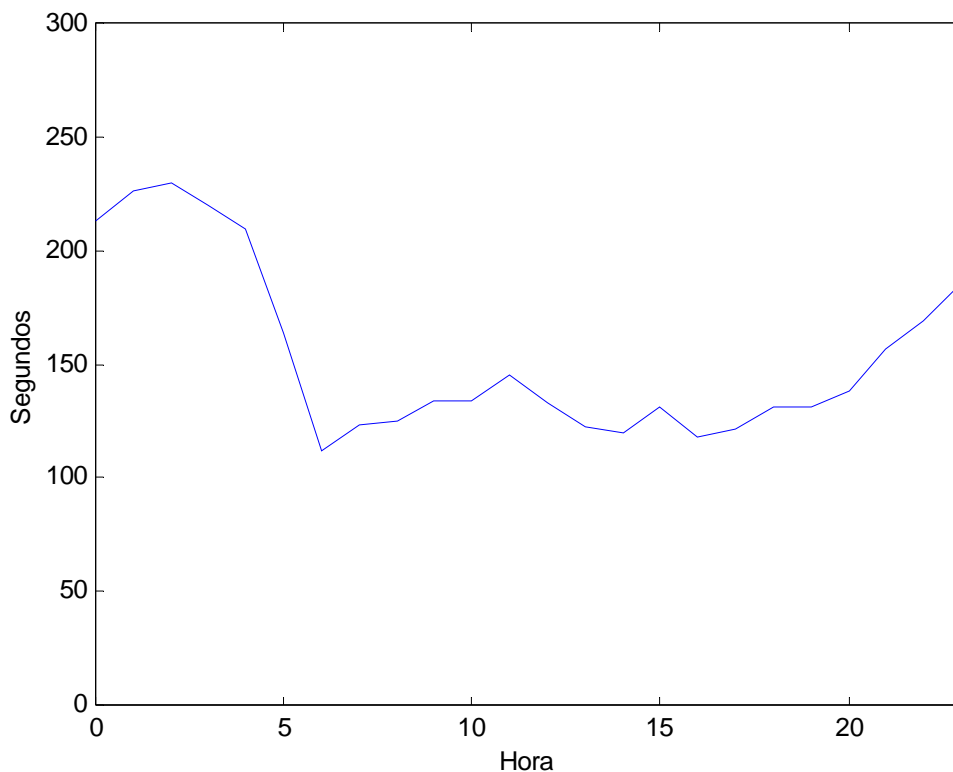


Figura 5.7 Duración media de la llamada de terminación recibida por UC3MOVIL

El modelado de tráfico llevado a cabo tiene como objetivo el disponer de unos datos realistas que permitan ejecutar las tareas de predicción de tráfico y optimización de tarifas de terminación de voz de UC3MOVIL. Para estas tareas no es necesario conocer la duración exacta de todas y cada una de las llamadas. De hecho, para modelar los tipos de esquemas de tarificación empleados en España sólo es necesario conocer la siguiente información:

- Número total de llamadas en cada hora.
- Duración total del tráfico recibido en cada hora.
- Número de llamadas de duración menor o igual a un minuto recibidas en cada hora.
- Duración del tráfico correspondiente a llamadas de duración menor o igual a un minuto recibidas en cada hora.

El procedimiento seguido para obtener el valor de cada una de estas variables es sencillo. Para cada día y cada hora, hemos ido generando llamadas de duración aleatoria según la salida de una distribución exponencial

centrada en la duración media correspondiente, hasta completar el volumen de tráfico asignado a esa hora concreta. Después, identificamos el número y la duración de las llamadas de duración menor o igual a un minuto (duración del periodo de franquicia), y almacenamos el resultado.

En la siguiente figura mostramos el número total de llamadas de terminación recibidas diariamente por UC3MOVIL, junto con las de duración menor o igual al periodo de franquicia. Se aprecia que el perfil de la intensidad de tráfico es prácticamente el mismo que el del volumen de tráfico.

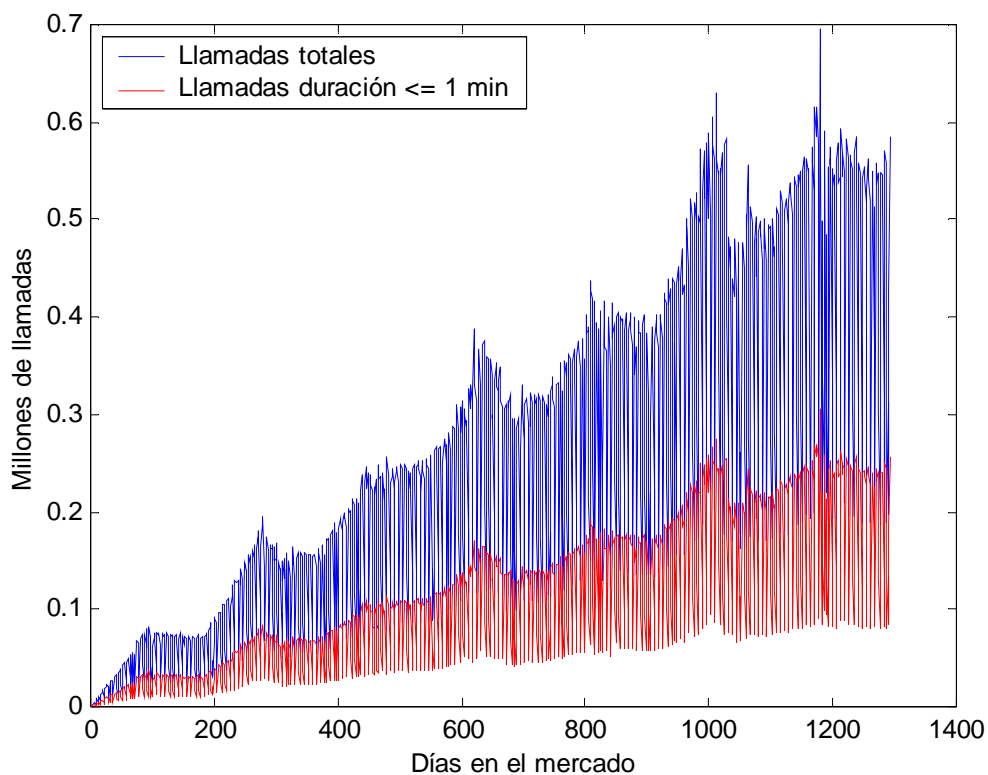


Figura 5.8 Intensidad de tráfico de terminación diario recibido por UC3MOVIL

Por otra parte, queda reflejada la proporción de llamadas con duración menor o igual a un minuto. Éstas suponen un 35,8% del total de las llamadas en todo el periodo, que es un porcentaje elevado si se compara con el porcentaje de volumen de tráfico que generan, que es un 7,2%. Lo mostramos en la figura 5.9.

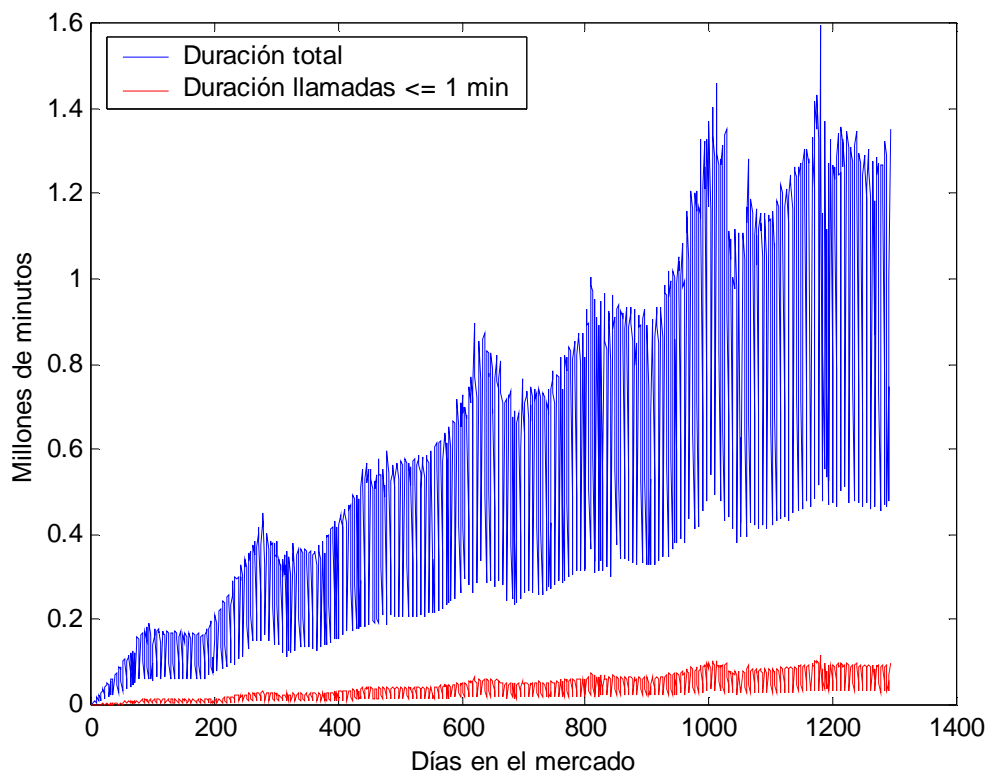


Figura 5.9 Volumen de tráfico terminación diario recibido por UC3MOVIL

La diferencia entre los porcentajes que acabamos de ver deja de manifiesto un hecho muy importante. Dependiendo del esquema de tarificación empleado, el ingreso medio por tráfico de terminación de un operador puede variar sustancialmente, no siendo posible saber a priori qué esquema es el más apropiado; esto destapa de nuevo la necesidad de utilizar un método de optimización para seleccionarlo. En el apartado 5.3 describiremos al detalle como hemos realizado la optimización.

En las figuras 5.10 y 5.11 representamos respectivamente la intensidad y el volumen de tráfico acumulado según la hora del día, diferenciando los datos referentes a llamadas de duración menor o igual a un minuto. Comparando ambas figuras se llega a las mismas conclusiones que acabamos de comentar, pero mientras que en las anteriores se aportaba además información de estacionalidad y tendencia, en estas últimas se aporta información respecto del hábito de uso del servicio de telefonía móvil.

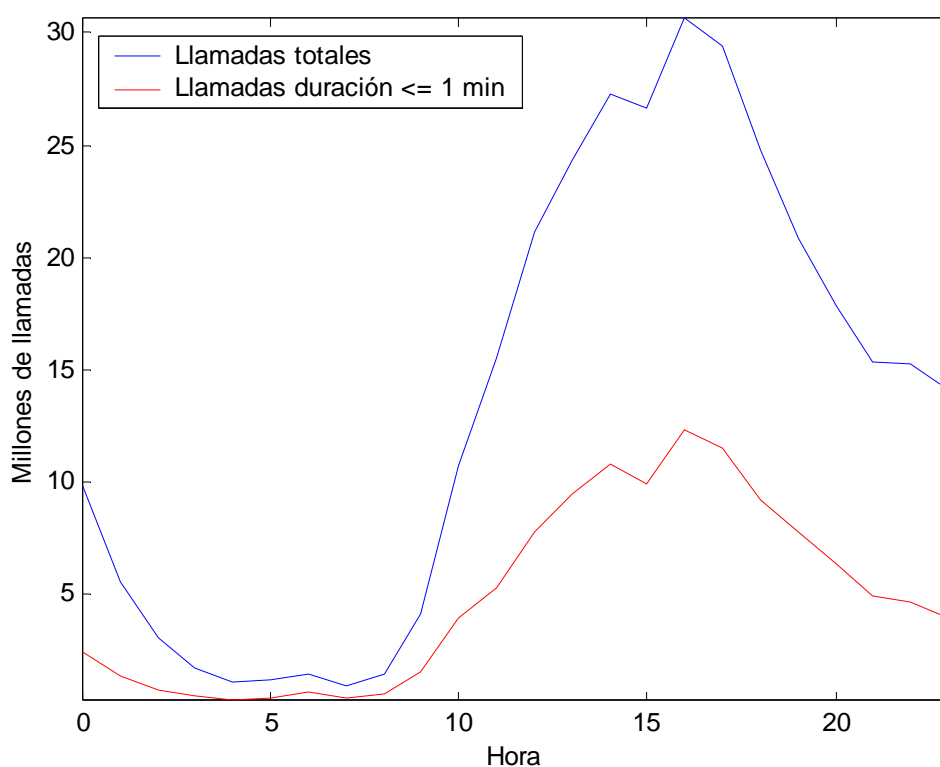


Figura 5.10 Intensidad de tráfico de terminación recibido por UC3MOVIL a lo largo del día

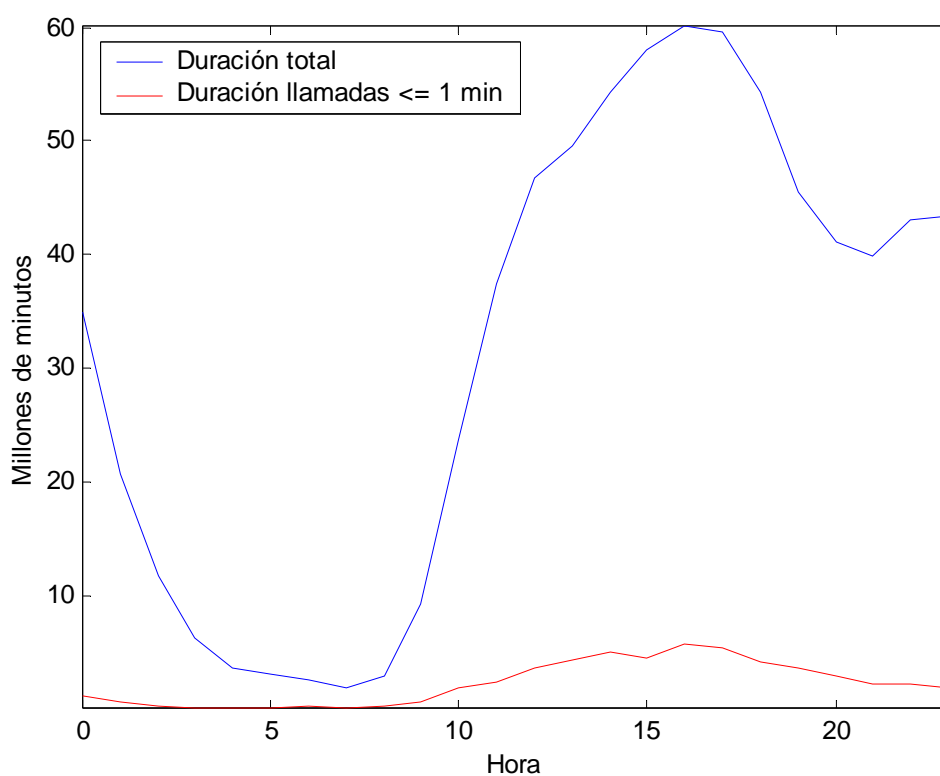


Figura 5.11 Volumen de tráfico de terminación recibido por UC3MOVIL a lo largo del día

5.1.3. Cuantificación de variables temporales independientes.

Confección de muestras

El volumen y la intensidad de tráfico, para el total de llamadas y para aquellas de duración menor o igual a un minuto, forman un conjunto de cuatro variables dependientes que permiten caracterizar totalmente el tráfico de terminación, de cara al problema de maximización de ingresos que estamos analizando. Tal como vimos en el capítulo 3, estas variables dependientes pueden ser predichas por medio de un conjunto reducido de cinco variables temporales independientes, que deberán ser obtenidas como paso previo a la predicción. A continuación describimos cómo las hemos cuantificado:

- Fecha. Esta variable independiente permite reflejar información sobre la tendencia. Con objeto de facilitar el procesado de la información, resulta conveniente expresaremos cada fecha con números naturales. De esta forma, el primer día en el mercado de UC3MOVIL, el 1 de octubre de 2005, se expresa como fecha 1, incrementando en una unidad para cada nueva fecha. Así, el último día considerado en el estudio, el 15 de abril de 2009, se expresa como fecha 1293.
- Día de la semana. Esta variable independiente permite reflejar la periodicidad en los días laborables y los comportamientos particulares de los sábados y domingos. Expresamos cada día de la semana por medio de un número natural, empezando con el 1 para el lunes y terminando con el 7 para el domingo.
- Día del año. Principalmente permite reflejar el fenómeno de estacionalidad. Expresamos cada día del año por medio de un número natural, empezando con el 1 para el 1 de enero y terminando con el 365 para el 31 de diciembre. Tenemos una excepción en el año 2008, por ser bisiesto; en este caso, representamos el 29 de febrero de 2008 por el número real 59,5.
- Semana del año. Permite reflejar la estacionalidad y la periodicidad respecto del día de la semana. Se expresa por medio de un número

natural, empezando con el 1 para la primera semana y terminando con el 52 o el 53, según proceda, para la última semana del año.

- Coeficiente de festivo. Mediante esta variable independiente se representa la porción de la población que celebra la festividad a cuantificar. Se corresponde con el coeficiente de ponderación α descrito anteriormente. Considerábamos tres ámbitos de festividad: nacional, autonómica y local, de modo que para festividades nacionales, $\alpha = 1$, mientras que para festivos autonómicos y locales, $0 < \alpha < 1$. De nuevo, sólo se incluyen las festividades locales de las capitales de provincia con población mayor al 0,5% de la población en España. Habitualmente α se desconocerá para el periodo a predecir, pero se puede obtener estimando linealmente la población de las 17 Comunidades Autónomas y de las localidades más relevantes; para esta tarea se alcanza una precisión más que suficiente tomando los datos de los últimos cuatro años.

Para terminar, vamos a explicar cómo se han confeccionado las muestras etiquetadas.

En los dos primeros puntos de este apartado hemos visto cómo se han generado los datos de tráfico de UC3MOVIL para cada una de las 24 horas del total de 1293 días considerados. Sin embargo, para las tareas requeridas en el procedimiento de maximización de ingresos terminación no es necesario mantener una precisión de una hora en el tráfico. En el capítulo 3 se explicaba cómo la CMT consideraba cinco intervalos de tiempo para establecer las tarifas nominales de terminación:

- Intervalo I1. Lunes a Viernes no festivos de 8:00 a 20:00 horas
- Intervalo I2. Lunes a Viernes no festivos de 20:00 a 21:00 horas
- Intervalo I3. Lunes a Viernes no festivos de 21:00 a 22:00 horas
- Intervalo I4. Sábados no festivos de 8:00 a 14:00 horas
- Intervalo I5. Resto del tiempo

Dado que la optimización de tarifas debe contemplar sólo estos intervalos, es posible agrupar el tráfico para su predicción, reduciendo

enormemente la carga computacional y manteniendo las propiedades de periodicidad, estacionalidad y tendencia en las muestras. Así, desglosando el tráfico diario según los siguientes horarios, pasamos de tener que realizar 24 predicciones a tener que hacer sólo 6 por cada día:

- Horario 1: de 0:00 a 8:00 horas
- Horario 2: de 8:00 a 14:00 horas
- Horario 3: de 14:00 a 20:00 horas
- Horario 4: de 20:00 a 21:00 horas
- Horario 5: de 21:00 a 22:00 horas
- Horario 6: de 22:00 a 24:00 horas

De esta forma, tendremos una muestra por cada día, por cada uno de estos horarios y por cada elemento de tráfico a predecir (número de llamadas, duración, número de llamadas de duración menor o igual a un minuto y duración total de las llamadas de duración menor o igual a un minuto). Por lo tanto tenemos un total de veinticuatro variables dependientes, con 1293 muestras por variable. Por ejemplo, la muestra del 19 de marzo de 2009 del horario de las 8:00 a las 14:00 horas, con la duración como elemento de tráfico, tiene un valor de 14513815 segundos, tal como se refleja seguidamente:

$x_1(k)$	$x_2(k)$	$x_3(k)$	$x_4(k)$	$x_5(k)$	$y(k)$
1266	4	78	12	0,5026	14513815

Tabla 5.3 Muestra 1266 de duración del horario 1

En esta tabla x_1 representa la fecha, x_2 el día de la semana, x_3 el día del año, x_4 la semana del año y x_5 el coeficiente de festivo.

Las muestras que abarcan el tráfico desde el 1 de octubre de 2005 hasta el 15 de octubre de 2008 han sido las utilizadas para el diseño y la implementación de las máquinas de predicción que veremos en el siguiente apartado. Por su parte, las muestras que van desde el 16 de octubre de 2008 hasta el 15 de abril de 2009 han generadas para el periodo bajo estudio, y han servido como referencia para evaluar la bondad del proceso completo de maximización de ingresos de tráfico de terminación.

5.2. SISTEMAS DE PREDICCIÓN DE TRÁFICO DE TERMINACIÓN

En los siguientes puntos describiremos la implementación y los resultados de los tres sistemas de predicción del tráfico de terminación de nuestro operador UC3MOVIL en el periodo bajo estudio.

Comenzaremos describiendo la regresión lineal, que es el método más sencillo de los tres, seguiremos con el perceptrón multicapa y continuaremos con el proceso Gaussiano. Después compararemos los resultados obtenidos por los tres métodos. Finalmente, demostraremos cómo cada una de las variables independientes es relevante para predecir el tráfico de terminación.

Para evaluar la bondad de cada método, hemos calculado el error de predicción para cada parámetro de tráfico y cada horario respecto del valor generado para UC3MOVIL. Así, tenemos una medida objetiva que permite evaluar los tres métodos y comparar los resultados obtenidos frente a las hipótesis planteadas en el caso de negocio descrito en el capítulo 3.

Todas las predicciones se han llevado a cabo por medio de tres pasos:

- a) Preprocesado de los datos de partida. Se ha normalizado de forma independiente cada componente de las variables de entrada (fecha, día de la semana, día del año, semana del año y coeficiente de festivo). Los valores máximos se han obtenido de entre el total de variables de entrada, incluyendo tanto las empleadas para el diseño de las máquinas de predicción como las correspondientes al periodo bajo estudio. Cabe recordar que las variables de entrada son comunes para todas las predicciones realizadas.

Por otra parte se han normalizado las variables de salida de las muestras empleadas para el diseño de las máquinas de predicción. Esta normalización se ha hecho de forma independiente para cada horario y parámetro de tráfico predicho.

- b) Implementación de la máquina de predicción. Ha consistido en la particularización de los métodos descritos en el capítulo 4 para nuestro

problema de predicción. Las diferentes variantes utilizadas se indican en los puntos siguientes.

- c) Procesado de los resultados. Simplemente ha consistido en la ponderación de las predicciones obtenidas, usando los valores máximos de las variables de salida consideradas en el preprocesado de los datos de partida. Así, hemos obtenido los valores absolutos de los parámetros de tráfico predichos, lo cual permite su utilización en el sistema de optimización de tarifas que se describirá en el apartado 5.3.

5.2.1. Regresión Lineal

Como ya explicó en el capítulo 4, esta técnica se basa en la obtención del vector de coeficientes que describe la relación lineal de las entradas con las salidas. Para ello se calcula la matriz pseudo-inversa de Moore – Penrose a partir del conjunto de muestras de entrenamiento, según la expresión 4.6.

Para ilustrar los resultados de la regresión utilizamos la siguiente tabla, que indica el error de predicción para cada horario y parámetro de tráfico en el periodo bajo estudio. El error se calcula como la diferencia entre el tráfico predicho menos el tráfico de UC3MOVIL. Se expresa en valor absoluto (en millones de minutos o llamadas, según proceda) y en porcentaje, que se ha obtenido dividiendo el error de predicción por el valor de tráfico de UC3MOVIL correspondiente.

HORARIO	PARÁMETRO DE TRÁFICO							
	Duración (minutos)		Duración llamadas ≤ 1min (minutos)		Llamadas (llamadas)		Llamadas ≤ 1min (llamadas)	
	%	millones	%	millones	%	millones	%	millones
0:00h a 8:00h	2,67%	0,57	2,58%	0,02	2,62%	0,16	2,59%	0,04
8:00h a 14:00h	2,79%	1,19	2,81%	0,09	2,81%	0,54	2,82%	0,20
14:00h a 20:00h	2,40%	2,00	2,41%	0,17	2,41%	0,97	2,43%	0,38
20:00h a 21:00h	3,18%	0,33	3,07%	0,02	3,20%	0,14	3,22%	0,05
21:00h a 22:00h	2,00%	0,20	2,15%	0,01	2,10%	0,08	2,22%	0,03
22:00h a 24:00h	2,73%	0,59	2,79%	0,03	2,81%	0,21	2,86%	0,06
ACUMULADO	2,58%	4,88	2,57%	0,35	2,58%	2,11	2,60%	0,76

Tabla 5.4 Error de predicción por horario y parámetro de tráfico en el periodo bajo estudio (Regresión lineal)

A la vista de esta tabla, lo primero que se puede destacar es que el error de predicción se mantiene en valores bajos para todos los horarios y todos los parámetros de tráfico. Su valor máximo en porcentaje es de un 3,22%, obtenido para la predicción del número de llamadas de duración menor o igual a un minuto, en el horario que va desde las 20:00h a las 21:00h. Este error máximo es razonable, encontrándose dentro de los escenarios de negocio descritos en el capítulo 3, que contemplaban un margen de variación de la predicción de entre -5% y +5% respecto del tráfico de UC3MOVIL. Por otra parte, la dispersión del error de predicción entre parámetros de tráfico es muy pequeña, reproduciéndose los valores máximo y mínimo del error para los mismos horarios (de 20:00h a 21:00h el máximo y de 21:00h a 22:00h el mínimo). Esto es debido a que los perfiles de los cuatro parámetros de tráfico son muy similares, y a la formulación que presenta la regresión lineal. Para ilustrar el comportamiento de la regresión lineal empleamos la figura 5.12, que muestra la predicción diaria del volumen de tráfico en el periodo bajo estudio. Se ha construido como suma de las predicciones individuales de cada horario en un mismo día, y se expresa en millones de minutos.

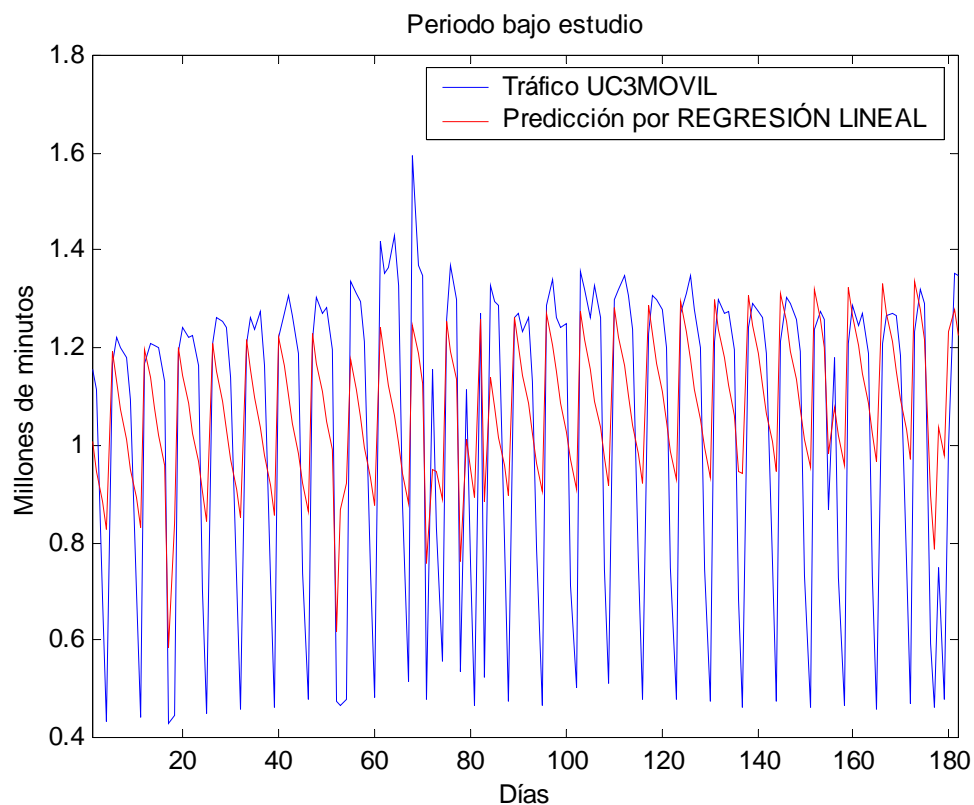


Figura 5.12 Volumen de tráfico de UC3MOVIL vs. Predicción para cada día del periodo bajo estudio (Regresión lineal)

De cara a la optimización de las tarifas de terminación también es necesario analizar el comportamiento de la predicción en los diferentes días de la semana y en los festivos. Para esto, se ha elaborado la siguiente tabla, que indica el error de predicción en el periodo bajo estudio para cada parámetro de tráfico. Se desglosa para cada día de la semana, con los festivos aparte.

DÍA	PARÁMETRO DE TRÁFICO							
	Duración (minutos)		Duración llamadas ≤ 1min (minutos)		Llamadas (llamadas)		Llamadas ≤ 1min (llamadas)	
	%	millones	%	millones	%	millones	%	millones
LUNES	0,58%	0,17	-0,66%	-0,01	-0,22%	-0,02	-0,67%	-0,03
MARTES	-7,04%	-2,00	-7,10%	-0,15	-7,06%	-0,87	-7,06%	-0,31
MIÉRCOLES	-10,55%	-3,52	-10,73%	-0,27	-10,69%	-1,54	-10,72%	-0,55
JUEVES	-15,22%	-3,66	-15,66%	-0,27	-15,45%	-1,60	-15,60%	-0,58
VIERNES	-14,36%	-3,94	-16,41%	-0,33	-15,66%	-1,87	-16,46%	-0,71
SÁBADO	28,84%	4,96	34,16%	0,40	32,20%	2,31	34,32%	0,86
DOMINGO	90,88%	11,17	101,88%	0,84	97,93%	4,94	-0,67%	1,80
FESTIVOS	9,58%	1,70	10,36%	0,13	10,02%	0,76	10,35%	0,28

Tabla 5.5 Error de predicción por tipo de día y parámetro de tráfico del periodo bajo estudio (Regresión lineal)

La tabla arroja que la regresión lineal se comporta muy bien para los lunes (error menor del 1% en valor absoluto), pero mal para el resto de días, ya que el tráfico predicho es muy diferente al tráfico de UC3MOVIL. El error de predicción es especialmente notable durante los fines de semana, para los que la predicción es muy superior al tráfico de UC3MOVIL, llegando a doblarlo en los domingos. Estos resultados dejan de manifiesto que la regresión lineal carece de la suficiente capacidad expresiva para modelar el perfil semanal del tráfico de terminación. Por su parte, el error de predicción en los festivos ronda el 10%, que es un valor demasiado elevado aún en siendo mejor que para los días de la semana; su modelado de nuevo se ve afectado por la falta de capacidad expresiva de la máquina.

Las deficiencias de la regresión lineal para reproducir el perfil de tráfico semanal quedan aún más evidenciadas en la figura 5.13, que muestra el detalle de la predicción del volumen de tráfico diario desde el 15 de diciembre al 30 de enero. Se observa cómo el tráfico predicho se reduce de manera

prácticamente lineal desde los lunes hasta los domingos, como por ejemplo en la figura, del 12 al 18 de enero (días 89 a 95).

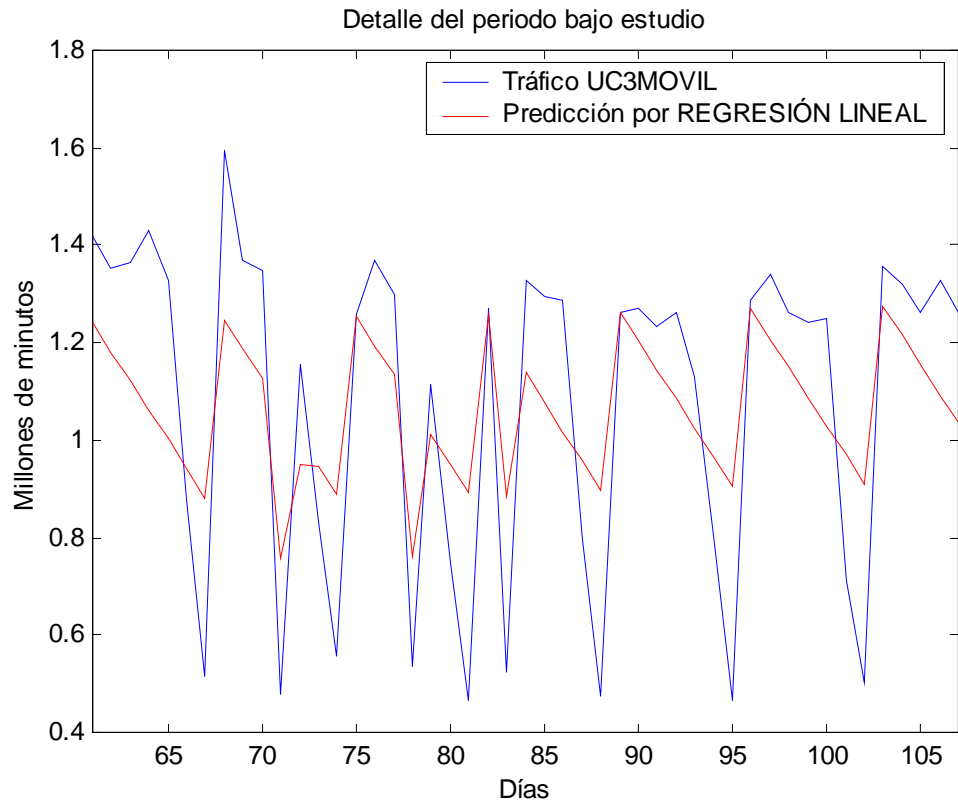


Figura 5.13 Volumen de tráfico de UC3MOVIL vs. Predicción entre el 15/12/08 y el 30/01/09 (Regresión lineal)

En la figura anterior se aprecia claramente cómo la predicción no reproduce el perfil semanal, que se caracteriza por un nivel de tráfico similar de lunes a viernes, seguido de una brusca caída en el fin de semana. Esto es relevante, porque el peso de estos días en el cálculo de las tarifas nominales es muy importante, ya que una hipotética la franja reducida siempre engloba los festivos, la totalidad del tráfico del domingo, y todo o la mayor parte del sábado.

Podemos resumir los resultados obtenidos por la regresión lineal diciendo que se trata de un método útil de cara a obtener una primera aproximación para nuestro problema, ya que su predicción de tráfico acumulado es buena, es una técnica sencilla y presenta un reducido coste de cómputo. Sin embargo, su limitada capacidad expresiva a la hora de modelar los perfiles de tráfico podría desvirtuar el resultado de la optimización de tarifas nominales. Se necesita una predicción fiable de los fines de semana y los

festivos para que la optimización de las tarifas conduzca a una maximización de los ingresos de terminación. Por esto, la regresión lineal es un método desaconsejable para servir de base en nuestro problema de predicción.

5.2.2. Perceptrón Multicapa

Antes de comentar los resultados del perceptrón multicapa, vamos a indicar cómo se eligió la arquitectura que se ha empleado. Para ello, primero tuvimos que seleccionar la función de activación de las neuronas, para después elegir el número de capas ocultas y las neuronas por capa. Como función de activación se tomó la sigmoide en lugar de la tangente hiperbólica, debido a que el tráfico normalizado varía entre 0 y 1, que coincide con el intervalo de variación de la salida de una sigmoide. Dado que a priori no disponíamos de información suficiente para determinar el número de capas y las neuronas por capa, diseñamos un experimento para ayudarnos en la elección. Consistió en modelar diferentes arquitecturas, aplicarles los datos de partida varias veces y evaluar los resultados. Se realizó en los siguientes pasos:

1. Selección de los datos de entrenamiento y validación. Se tomaron como datos de partida las muestras del volumen de tráfico de UC3MOVIL. Se repartieron de forma aleatoria en dos grupos, uno de entrenamiento y otro de validación, el primero con 929 muestras y el segundo con 182. De este modo, la validación se realizó con el mismo número de muestras que el periodo bajo estudio. Los conjuntos de validación se utilizaron para detener cada ejecución, si bien también se impuso un número máximo de 100 iteraciones para este cometido.
2. Selección de la arquitectura. Para explorar un espectro amplio de arquitecturas, realizando un número razonable de pruebas, se optó por ir incrementando progresivamente el número de neuronas por capa. Se siguieron las potencias de 2 hasta un total de 32 neuronas, dando lugar a arquitecturas de 1, 2, 4, 8, 16 y 32 neuronas por capa.
3. Implementación la red y obtención de resultados. Se aplicaron los procedimientos descritos en el apartado 4.2.3 para obtener los coeficientes de cada red. Después, se obtuvo su salida para el conjunto

de datos de diseño, y se calculó el error de predicción por horario y por día (según los días de la semana con los festivos aparte).

4. Volver a 2. Se realizó un total de 10 predicciones por cada arquitectura.

El objetivo del experimento fue obtener información para seleccionar una arquitectura de red que ofreciera suficiente capacidad expresiva para modelar adecuadamente los perfiles de tráfico, manteniendo la generalización. Además, era deseable que la dispersión de los resultados ante diferentes inicializaciones de la arquitectura fuese baja, lo cual implicaría robustez en dicha arquitectura.

De la inspección de los resultados del experimento se comprobó cómo las arquitecturas de dos capas llegaban a alcanzar menor error de predicción sobre el conjunto de muestras de diseño, pero eran muy sensibles a la inicialización. En contraposición a esto se vio que las redes de una capa eran más robustas, manteniendo un error de predicción bajo y proporcionando así un mejor compromiso atendiendo al conjunto de proposiciones anteriores.

De entre las redes de una capa, se observó que con una buena inicialización, las redes de 8 y 16 neuronas llegaban a proporcionar un error de predicción en valor absoluto por debajo del 5% sobre las muestras de diseño, lo cual les hacía válidas para resolver nuestro problema. Se comprobó cómo las redes de 8 neuronas eran más robustas, al tener una dispersión menor ante varias inicializaciones, mientras que las de 16 neuronas llegaron a alcanzar un error de predicción menor. Ante estos resultados, se optó por simular redes de una capa con 12 neuronas, y se vio cómo aunaban la robustez y la capacidad expresiva de las arquitecturas de 8 y 16 neuronas. Además, al aplicar los datos del periodo bajo estudio, se pudo comprobar cómo además la arquitectura de una capa de 12 neuronas ofrecía también una buena generalización, ya que los resultados obtenidos ante este nuevo juego de datos fueron muy buenos, tal como se refleja en la tabla siguiente.

HORARIO	PARÁMETRO DE TRÁFICO							
	Duración (minutos)		Duración llamadas ≤ 1min (minutos)		Llamadas (llamadas)		Llamadas ≤ 1min (llamadas)	
	%	millones	%	millones	%	millones	%	millones
0:00h a 8:00h	1,27%	0,27	0,62%	0,00	-0,64%	-0,04	-0,87%	-0,01
8:00h a 14:00h	0,58%	0,24	2,16%	0,07	-1,47%	-0,29	1,00%	0,07
14:00h a 20:00h	-1,53%	-1,28	-2,27%	-0,16	-0,92%	-0,37	-1,61%	-0,25
20:00h a 21:00h	3,46%	0,36	2,56%	0,02	-0,28%	-0,01	-3,21%	-0,05
21:00h a 22:00h	-2,07%	-0,21	-2,55%	-0,01	-4,31%	-0,17	1,06%	0,01
22:00h a 24:00h	-1,94%	-0,42	0,03%	0,00	1,92%	0,14	0,18%	0,00
ACUMULADO	-0,54%	-1,03	-0,60%	-0,08	-0,90%	-0,73	-0,77%	-0,23

Tabla 5.6 Error de predicción por horario y parámetro de tráfico en el periodo bajo estudio (Perceptrón de 1 capa oculta de 12 neuronas)

La tabla anterior se ha construido seleccionando los mejores resultados, para cada parámetro de tráfico, del conjunto de muestras de diseño ante 10 inicializaciones de un perceptrón de una capa oculta de 12 neuronas. De la inspección de los resultados, lo primero que se puede destacar es que el error de predicción se mantiene en valores bajos para todos los horarios y todos los parámetros de tráfico. Su valor absoluto máximo acumulado para cada parámetro es muy bueno (no alcanza el 1% en ningún caso). Por su parte, el error máximo en valor absoluto por horario es de un 4,31%, que es razonable, ya que está en el intervalo de $\pm 5\%$ respecto del tráfico de UC3MOVIL. Por otra parte, la dispersión del error de predicción ha crecido respecto de la regresión lineal. Esto es debido esencialmente a la dependencia del perceptrón multicapa con la inicialización, lo que proporciona mayor variabilidad a los resultados. Esto no supone un gran inconveniente, ya que se soluciona inicializando la red en varias ocasiones, tal como se ha realizado. Las buenas prestaciones del perceptrón de una capa oculta de 12 neuronas también quedan de manifiesto en la siguiente figura, que representa la predicción diaria del volumen de tráfico en el periodo bajo estudio.

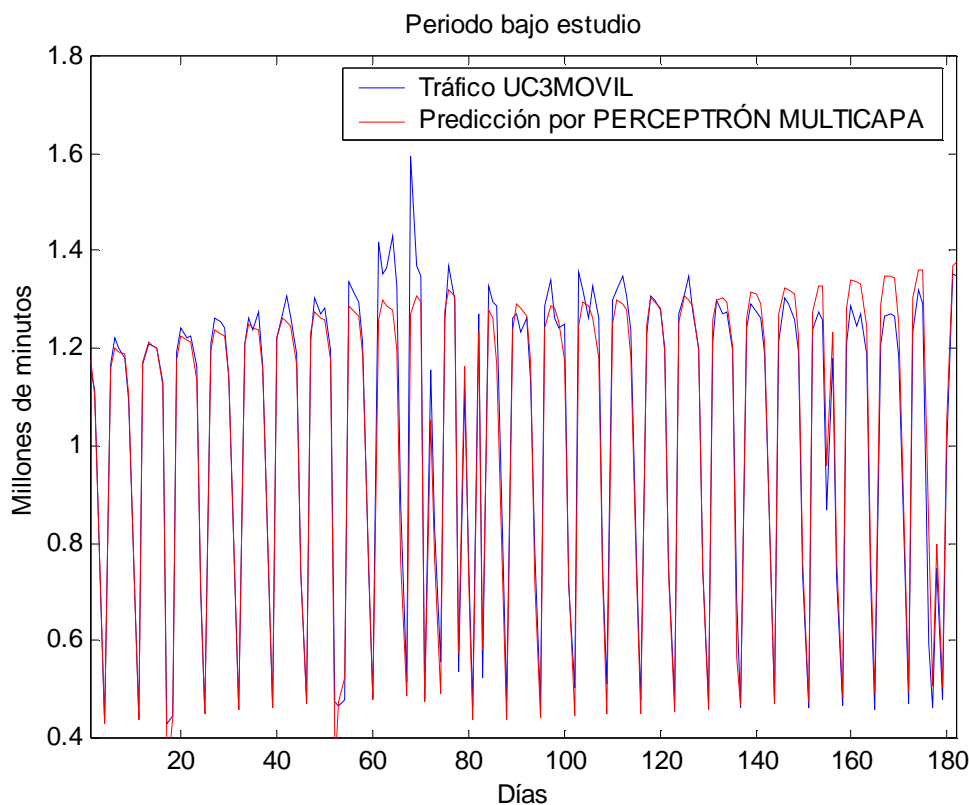


Figura 5.14 Volumen de tráfico de UC3MOVIL vs. Predicción para cada día del periodo bajo estudio (Perceptrón de 1 capa oculta de 12 neuronas)

Para analizar el comportamiento de la predicción en los diferentes días de la semana y en los festivos vamos a utilizar la siguiente tabla, análoga a la 5.5 empleada en la exposición de la regresión lineal, y que indica el error de predicción en el periodo bajo estudio para cada parámetro de tráfico.

DÍA	PARÁMETRO DE TRÁFICO							
	Duración (minutos)		Duración llamadas ≤ 1min (minutos)		Llamadas (llamadas)		Llamadas ≤ 1min (llamadas)	
	%	millones	%	millones	%	millones	%	millones
LUNES	-1,17%	-0,34	-2,86%	-0,06	-4,57%	-0,58	-1,67%	-0,08
MARTES	-0,25%	-0,07	-1,10%	-0,02	-1,09%	-0,13	-1,42%	-0,06
MIÉRCOLES	0,35%	0,17	-0,39%	-0,01	1,50%	0,22	-0,14%	-0,01
JUEVES	-0,32%	-0,08	2,23%	0,04	2,23%	0,23	-0,77%	-0,03
VIERNES	-0,96%	-0,26	0,42%	0,01	-3,71%	-0,44	-0,66%	-0,03
SÁBADO	-0,90%	-0,15	-0,40%	0,00	0,88%	0,06	2,94%	0,07
DOMINGO	-2,16%	-0,26	-1,76%	-0,01	-0,72%	-0,04	-2,46%	-0,04
FESTIVOS	-0,13%	-0,02	-1,35%	-0,02	-0,66%	-0,05	-1,95%	-0,05

Tabla 5.7 Error de predicción por tipo de día y parámetro de tráfico del periodo bajo estudio (Perceptrón de 1 capa oculta de 12 neuronas)

De la tabla se desprende que el perceptrón diseñado es capaz de modelar aceptablemente el tráfico de terminación, para todos los parámetros y todos los días. De hecho, el comportamiento es muy similar al reflejado en la tabla 5.6, ya que el error se mantiene en valores bajos en todos los casos, pero con una dispersión mayor. Es especialmente relevante el hecho de que el perceptrón sea capaz de modelar con mucha precisión los sábados, los domingos y los festivos. Como ya hemos comentado, estos días son muy importantes a la hora de determinar las tarifas nominales, por lo que la mejora respecto de la regresión lineal es determinante.

El buen comportamiento de la predicción respecto del día de la semana y los festivos también queda reflejado en la figura 5.15, que muestra el detalle de la predicción del volumen de tráfico diario desde el 15 de diciembre al 30 de enero.

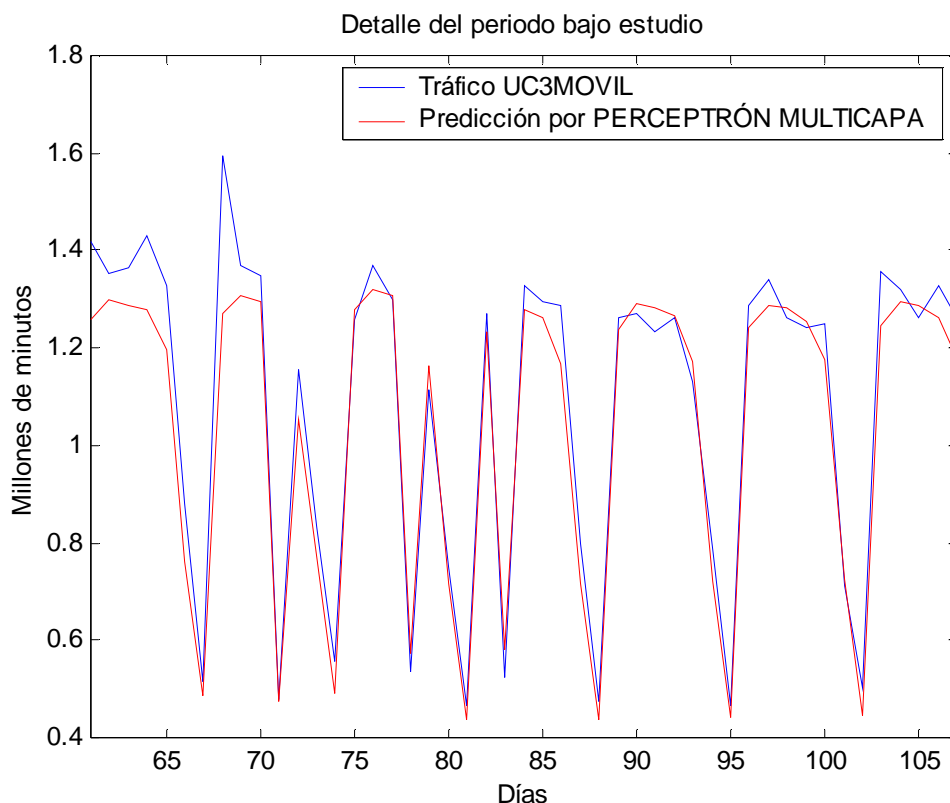


Figura 5.15 Volumen de tráfico de UC3MOVIL vs. Predicción entre el 15/12/08 y el 30/01/09
(Perceptrón de 1 capa oculta de 12 neuronas)

La figura refleja cómo la predicción reproduce con bastante fidelidad el perfil semanal. Esto se aprecia con claridad en el resultado de las dos semanas

comprendidas entre el lunes 12 y el domingo 25 de enero (días 89 a 102). Por su parte, también se puede observar cómo los festivos se modelan correctamente, hecho que queda reflejado en las predicciones del 25 de diciembre, el 1 y el 6 de enero (días 71, 78 y 83 respectivamente).

Es importante indicar que, a pesar de sus buenas prestaciones, el perceptrón diseñado no consigue modelar con total fidelidad los casos en que la estacionalidad provoca un cambio grande en el perfil, como por ejemplo ocurre en la campaña de Navidad. Esto se aprecia en la figuras 5.14 y 5.15, en las que se ve cómo la predicción se separa ligeramente del perfil de tráfico entre el 15 y el 24 de diciembre (días 61 a 70). En cualquier caso, esto no supone un problema, ya que el error de predicción se mantiene en niveles muy bajos, reproduciendo con suficiente fidelidad los perfiles de los festivos, de los días de la semana y de los diferentes horarios.

Podemos resumir los resultados obtenidos por el perceptrón multicapa diciendo que se trata de un método con la robustez, la generalización y la capacidad expresiva necesarias para modelar el tráfico de terminación de voz. Esto significa que es una técnica válida para servir como punto de partida a la optimización de tarifas nominales, al contrario que la regresión lineal.

5.2.3. Proceso Gaussiano

A la hora de realizar la predicción mediante un proceso Gaussiano, lo más importante es seleccionar una función de covarianza adecuada, de forma que se consiga la capacidad expresiva necesaria para modelar cada problema.

En nuestro caso, para confeccionar la función de covarianza que finalmente utilizamos, realizamos una serie de pruebas con funciones cada vez más complejas. De esta forma, partimos de una función sencilla a la que fuimos añadiendo nuevos términos, tratando de minimizar el error de predicción sobre los datos de diseño. En cada prueba, los parámetros de cada término se optimizaron mediante un algoritmo de gradiente conjugado, ejecutado hasta un máximo de 100 iteraciones. Comenzamos las pruebas con una función de covarianza formada por una exponencial cuadrada más un término de ruido Gaussiano. Después incorporamos un término lineal, otro constante y finalmente un término periódico de tipo sinusoidal. La función así

confeccionada se corresponde con la adelantada en la expresión 4.34 incluida en el capítulo anterior. Esta función de covarianza nos proporcionó resultados muy buenos a la hora de predecir el tráfico de terminación del periodo bajo estudio. Esto queda reflejado en la siguiente tabla, que indica el error de predicción para cada horario y parámetro de tráfico.

HORARIO	PARÁMETRO DE TRÁFICO							
	Duración (minutos)		Duración llamadas ≤ 1min (minutos)		Llamadas (llamadas)		Llamadas ≤ 1min (llamadas)	
	%	millones	%	millones	%	millones	%	millones
0:00h a 8:00h	-0,10%	-0,02	0,15%	0,00	0,06%	0,00	0,13%	0,00
8:00h a 14:00h	-0,06%	-0,02	0,12%	0,00	0,13%	0,02	-0,15%	-0,01
14:00h a 20:00h	-0,83%	-0,69	-0,84%	-0,06	-0,67%	-0,27	-0,83%	-0,13
20:00h a 21:00h	-2,23%	-0,23	-1,61%	-0,01	-1,67%	-0,07	-1,30%	-0,02
21:00h a 22:00h	-2,45%	-0,25	-2,68%	-0,02	-2,52%	-0,10	-2,41%	-0,03
22:00h a 24:00h	-0,79%	-0,17	-0,86%	-0,01	-0,67%	-0,05	-0,69%	-0,01
ACUMULADO	-0,73%	-1,39	-0,67%	-0,09	-0,46%	-0,70	-0,70%	-0,20

Tabla 5.8 Error de predicción por horario y parámetro de tráfico en el periodo bajo estudio (Proceso Gaussiano)

Estos resultados arrojan un error de predicción bajo para todos los horarios y todos los parámetros de tráfico. Su valor absoluto máximo acumulado para cada parámetro es excelente, ya que no alcanza el 1% en ningún caso, al igual que con el perceptrón multicapa. Si comparamos el error máximo en valor absoluto por horario frente al obtenido con el perceptrón, vemos que con el proceso Gaussiano se ha reducido un 38%, lo cual supone una mejora muy significativa. Además, la dispersión del error de predicción entre parámetros de tráfico también es menor. Esto es debido a que los perfiles de los cuatro parámetros de tráfico son muy similares, y a que los procesos Gaussianos no tienen los problemas de inicialización del perceptrón multicapa.

Los buenos resultados del proceso Gaussiano también quedan de manifiesto en la siguiente figura, que muestra la predicción diaria del volumen de tráfico en el periodo bajo estudio.

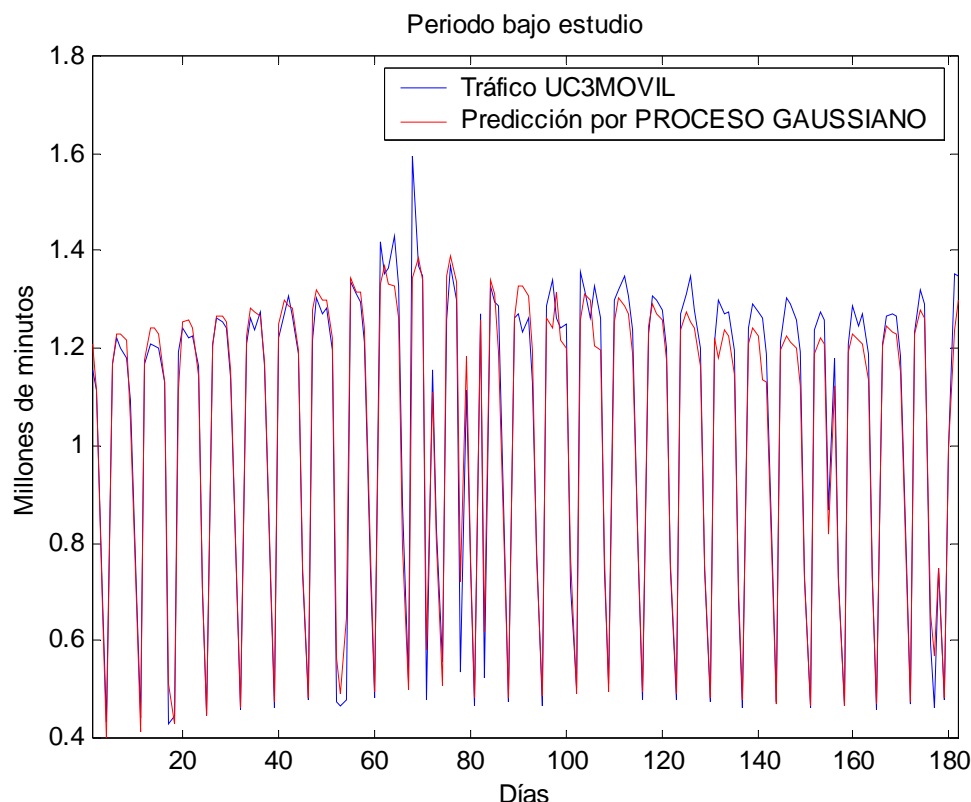


Figura 5.16 Volumen de tráfico de UC3MOVIL vs. Predicción para cada día del periodo bajo estudio (Proceso Gaussiano)

Para continuar el análisis del proceso Gaussiano vamos a analizar el comportamiento de la predicción en los festivos y en los distintos días de la semana. Para ello, vamos a usar la tabla 5.9, que indica el error de predicción en el periodo bajo estudio por día y parámetro de tráfico. Esta tabla es similar a las usadas en las exposiciones de la regresión lineal y el perceptrón multicapa.

DÍA	PARÁMETRO DE TRÁFICO							
	Duración (minutos)		Duración llamadas ≤ 1min (minutos)		Llamadas (llamadas)		Llamadas ≤ 1min (llamadas)	
	%	millones	%	millones	%	millones	%	millones
LUNES	-1,54%	-0,45	-1,99%	-0,04	-1,60%	-0,20	-2,21%	-0,10
MARTES	-0,49%	-0,14	-0,42%	-0,01	-0,15%	-0,02	-0,57%	-0,03
MIÉRCOLES	-0,55%	-0,18	-0,41%	-0,01	-0,21%	-0,03	-0,59%	-0,03
JUEVES	-0,57%	-0,14	-0,45%	-0,01	-0,12%	-0,01	-0,63%	-0,02
VIERNES	-1,83%	-0,50	-1,85%	-0,04	-1,56%	-0,19	-2,20%	-0,09
SÁBADO	-0,42%	-0,07	0,24%	0,00	-0,45%	-0,03	0,81%	0,02
DOMINGO	0,05%	0,01	0,10%	0,00	-0,87%	-0,04	1,57%	0,03
FESTIVOS	0,51%	0,09	0,89%	0,01	0,79%	0,06	0,89%	0,02

Tabla 5.9 Error de predicción por tipo de día y parámetro de tráfico del periodo bajo estudio (Proceso Gaussiano)

Como vemos en la tabla, el valor absoluto del error de predicción obtenido es muy bajo para cualquier día y cualquier parámetro de tráfico. Su valor máximo es ahora de un 2,21% (obtenido para las llamadas de duración menor o igual a un minuto de los lunes). Este buen comportamiento queda de manifiesto en la figura 5.17, que muestra el detalle de la predicción del volumen de tráfico diario desde el 15 de diciembre al 30 de enero.

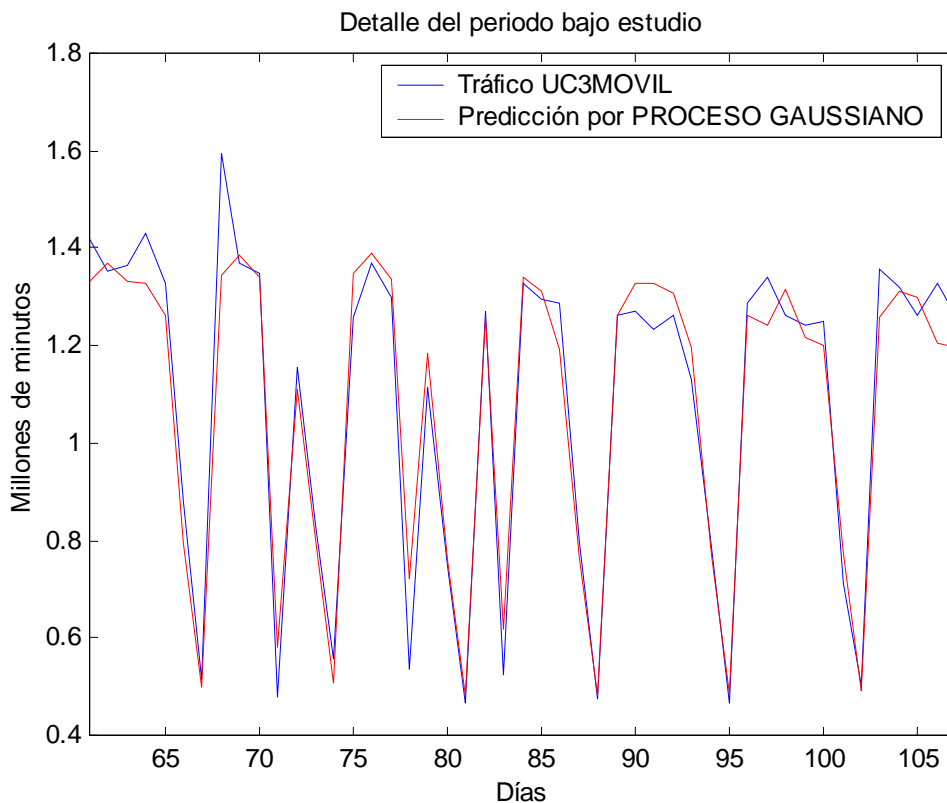


Figura 5.17 Volumen de tráfico de UC3MOVIL vs. Predicción entre el 15/12/08 y el 30/01/09 (Proceso Gaussiano)

Observando las predicciones de sábados, domingos y festivos, vemos cómo se consigue un bajo error máximo en valor absoluto, no llegando al 2%. Esto implica que el proceso Gaussiano diseñado es capaz de modelar correctamente el perfil semanal del tráfico de terminación. Este resultado de nuevo mejora el obtenido por el perceptrón multicapa. Por otra parte, hay que indicar que ahora la predicción es mayor que el tráfico de UC3MOVIL para los festivos, al contrario que con el perceptrón. Esto significa que la elección de una u otra predicción podría suponer una diferencia apreciable en las tarifas de terminación obtenidas, y por lo tanto, en los ingresos asociados. En cualquier

caso, dado que el error de predicción es pequeño en ambos casos, la diferencia de ingresos también sería pequeña.

Otro aspecto en el que el proceso Gaussiano supera al perceptrón es en el modelado de la estacionalidad. Esto se aprecia comparando las figuras 5.15 y 5.17 en los días 61 a 70, que están afectados por la campaña de Navidad (del 15 y el 24 de diciembre).

Por último, es necesario indicar que el coste de cómputo del proceso Gaussiano diseñado es notablemente superior al del perceptrón que se ha implementado. En concreto, el tiempo de proceso requerido por el proceso Gaussiano para la predicción de un parámetro de tráfico ha sido unas 900 veces superior al tiempo de proceso requerido por el perceptrón para la misma predicción, bajo las mismas condiciones. Esto es debido a dos motivos; por un lado, el perceptrón de una capa oculta de 12 neuronas que se ha implementado tiene asociado un tiempo de proceso muy pequeño (menor de un minuto para un ordenador doméstico) y por otro lado, el proceso Gaussiano requiere de acciones muy lentas en su ejecución. Es especialmente costoso el proceso de optimización de los hiperparámetros de la función de covarianza, que se realiza por medio un algoritmo de gradiente conjugado, que es una técnica lenta. En cualquier caso, el coste de cómputo del proceso Gaussiano es totalmente admisible, máxime considerando la relevancia de sus resultados.

Una vez analizados los tres métodos implementados, podemos afirmar que el proceso Gaussiano diseñado se trata de la mejor opción para la predicción del tráfico de terminación, ya que consigue que el error se mantenga en valores muy bajos para los cuatro parámetros de tráfico, en todos los horarios, y para todos los días. Esta robustez es una garantía de cara a la optimización de las tarifas nominales, y por lo tanto, para la maximización de los ingresos por el tráfico de terminación.

5.2.4. Efecto de las variables temporales independientes en la reducción del error de predicción

Uno de los factores determinantes para la predicción del tráfico de terminación ha sido la selección de las cinco variables independientes (fecha, día de la semana, día del año, la semana del año y coeficiente de festivo).

Como se ha podido comprobar en los puntos anteriores, aportan la información necesaria para elaborar una herramienta de predicción con suficiente capacidad expresiva para resolver nuestro problema.

En cualquier caso, resulta interesante demostrar que, efectivamente, todas estas variables son relevantes a la hora de reducir el error. Para llevar a cabo esta demostración diseñamos un sencillo experimento, consistente en realizar cinco predicciones, incrementando el número de variables independientes en cada predicción. Así, la primera predicción se realizó utilizando sólo la fecha, en la segunda se añadió el día de la semana, en la tercera el día del año, en la cuarta la semana del año y en la quinta el coeficiente de festivo. Las predicciones se ejecutaron mediante procesos Gaussianos sobre las muestras de diseño normalizadas. Para evaluar los resultados, utilizamos el error cuadrático medio, ya que sólo es interesante la variación relativa del error al añadir una nueva variable. Expresamos los resultados obtenidos en la siguiente tabla, donde x_1 representa la fecha, x_2 el día de la semana, x_3 el día del año, x_4 la semana del año y x_5 el coeficiente de festivo.

VARIABLES	mse
$x_1(k)$	0,0158
$x_1(k), x_2(k)$	0,0035
$x_1(k), x_2(k), x_3(k)$	0,0022
$x_1(k), x_2(k), x_3(k), x_4(k)$	0,0021
$x_1(k), x_2(k), x_3(k), x_4(k), x_5(k)$	0,0003

Tabla 5.10 Evolución del error cuadrático medio con la inclusión de cada nueva variable

De la tabla se desprende que las cinco variables son relevantes para modelar el tráfico de terminación, ya que el error cuadrático medio se reduce con la inclusión de cada nueva variable en la predicción. Cabe indicar que la variable que menos reduce el error al ser incluida es la semana del año. Esto es debido a que gran parte de la información que aporta está ya contenida en el día del año. En la figura 5.18 representamos el tráfico de UC3MOVIL frente a su predicción (en rojo en la figura), para el periodo que va desde el 1 de julio al 15 de octubre de 2008 (días 1005 a 1111). A la derecha de cada gráfica se indican las variables participantes en la predicción.

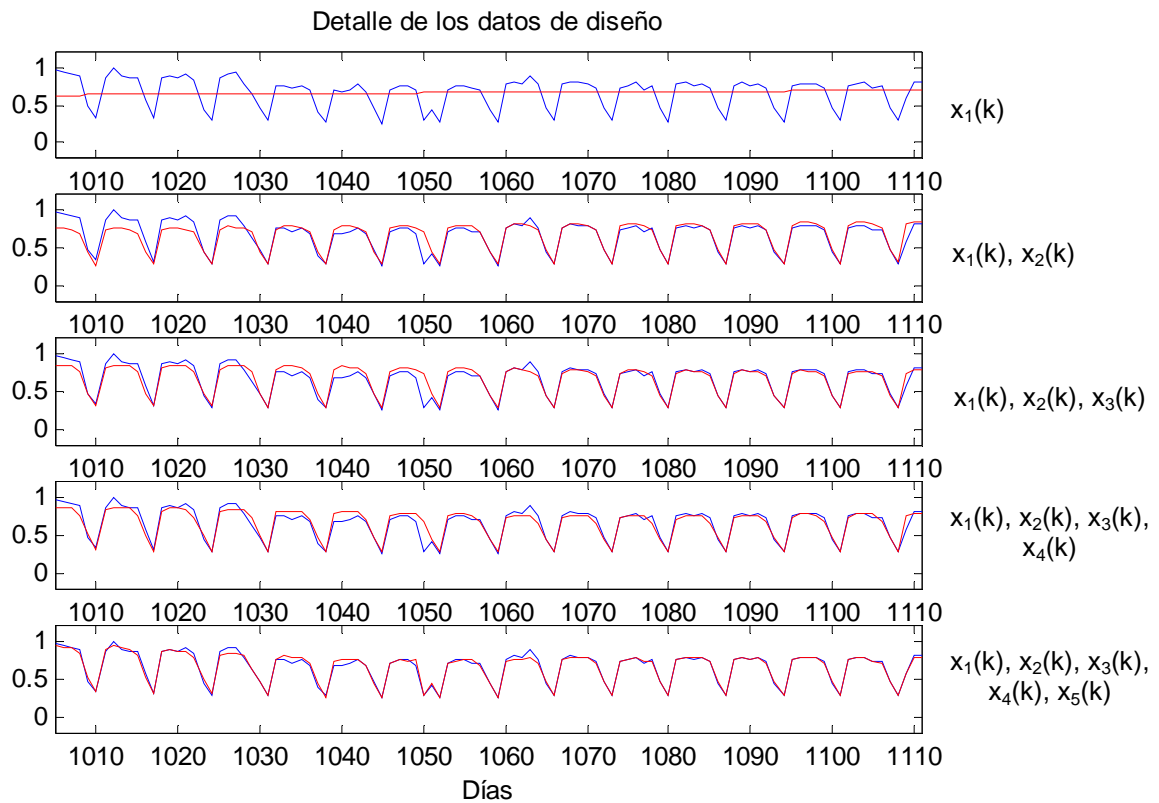


Figura 5.18 Variación de la predicción con la inclusión de cada nueva variable

En la figura se aprecia cómo la inclusión de cada nueva variable hace que la predicción se aproxime más al tráfico de UC3MOVIL. Si bien las variables influyen como se explicó en el capítulo 3, cabe destacar el efecto de dos de ellas. Por un lado, es muy notable cómo el día de la semana influye para modelar el perfil semanal de tráfico, y por otro lado también es destacable cómo la adición del coeficiente de festivo es determinante a la hora de modelar esos días, lo cual se aprecia claramente observando la predicción del 15 de agosto, que se trata de una fiesta nacional (día 1050 en la figura).

5.3. SISTEMA DE OPTIMIZACIÓN DE LAS TARIFAS NOMINALES DE TERMINACIÓN

El objetivo del sistema de optimización es obtener el esquema de tarificación y las tarifas asociadas que maximicen los ingresos de terminación, respetando el precio medio máximo impuesto por la CMT en el periodo bajo

estudio. Existen dos tipos de esquemas de tarificación posibles, uno basado en periodo de franquicia y el otro basado en establecimiento de llamada. Esto implica que hay dos tipos distintos de soluciones, una con dos elementos de tarificación (tarifas de las franjas normal y reducida) y otra con cuatro (las tarifas anteriores más los términos de establecimiento asociados). El algoritmo evolutivo en el que se basa el sistema de optimización es formalmente igual para ambos esquemas, ya que lo único que varía es el tipo de solución y los datos de tráfico de partida. Lo vemos seguidamente.

5.3.1. Implementación del algoritmo evolutivo

El algoritmo evolutivo se ha desarrollado según los pasos estándar de este tipo de técnicas, que ya describimos en el capítulo 4. Presentamos a continuación el detalle de la implementación de cada uno de estos pasos. El tráfico del periodo bajo estudio puede ser tanto el de UC3MOVIL como su predicción, en cuyo caso se emplea la conseguida por el proceso gaussiano descrito en el apartado anterior.

1. INICIALIZACIÓN. Se construye una población inicial 1000 individuos. Cada individuo representa un posible juego de tarifas óptimas. Los genes de cada individuo se crean aleatoriamente, como salida de una distribución uniforme centrada en el valor del precio medio máximo de la CMT, que para el periodo bajo estudio es $PM_{MAX} = 0,0803 \text{ €/minuto}$.
2. SELECCIÓN. En este paso se realizan varias acciones. Primero se comprueba la validez de cada individuo, seguidamente se toman medidas correctoras sobre algunos de ellos y finalmente se evalúa la calidad de la población.

La validez de cada individuo está determinada por dos condiciones. La primera es que deben respetar el precio medio máximo de la CMT, y la segunda es que los elementos de tarificación de franja reducida no pueden ser mayores que los de franja normal. Los individuos que no cumplen ninguna de estas condiciones son marcados y sustituidos por nuevos individuos generados aleatoriamente al final del proceso de

selección, mientras que los individuos que sólo cumplen una de ellas son corregidos y vueltos a insertar en la población.

Para evaluar si un individuo respeta el precio medio máximo PM_{MAX} , se aplica al tráfico de UC3MOVIL comprendido entre el 1 de mayo de 2007 y el 30 de abril de 2008, simulando así la restricción dada por la CMT. En caso de que el PM_{MAX} no se respete, pero sí se mantenga la relación entre franjas, se ponderan todos los términos de ese individuo por la relación entre el precio medio máximo y el precio medio obtenido. Por su parte, si el PM_{MAX} se respeta, pero no así la relación entre franjas, se ponderan los términos afectados de franja reducida por la salida de una distribución uniforme centrada en la mitad del valor del término de franja normal.

La calidad de la población se evalúa aplicando cada individuo sobre el tráfico del periodo bajo estudio. El individuo que mayores ingresos proporcione se almacena para la siguiente generación. Por su parte, los 200 peores individuos de la población son sustituidos por nuevos individuos generados aleatoriamente.

3. DETENCIÓN. Como criterio de parada del algoritmo se establece un valor máximo de 10.000 iteraciones. Como se verá en los siguientes puntos, este valor es más que suficiente para obtener las tarifas óptimas.
4. REPRODUCCIÓN. Para crear la siguiente generación se emplean los operadores genéticos de cruce y mutación. Para aplicar el operador de cruce, seorean aleatoriamente aquellos individuos cuya calidad no haya mejorado respecto de la iteración anterior. Se selecciona el porcentaje de cruce entre el 0% y el 100% según la salida de una distribución uniforme, construyendo los genes de los nuevos individuos como la suma ponderada de los genes de los individuos cruzados.

Por su parte, la mutación se aplica modificando aleatoriamente los genes de aquellos individuos cuya calidad está por debajo de la media. La mutación se ejecuta añadiendo la salida de una gaussiana de media nula y dispersión $\sigma = 10^{-7}$.

5.3.2. Pruebas de funcionamiento

Lo primero fue definir las posibles estructuras de tarificación de las franjas horarias. Los cinco intervalos horarios considerados por la CMT dan lugar a seis posibles estructuras, iguales para los esquemas basados en franquicia y para los basados en establecimiento de llamada. Estas estructuras se aplican tanto para evaluar los ingresos en el periodo bajo estudio, como para la validación del precio medio máximo de la CMT. Son las siguientes:

- Estructura 1:
 - Franja Normal: Lunes a Viernes no festivos de 8h a 20h
 - Franja Reducida: Resto del tiempo
- Estructura 2:
 - Franja Normal: Lunes a Viernes no festivos de 8h a 21h
 - Franja Reducida: Resto del tiempo
- Estructura 3:
 - Franja Normal: Lunes a Viernes no festivos de 8h a 22h
 - Franja Reducida: Resto del tiempo
- Estructura 4:
 - Franja Normal: Lunes a Viernes no festivos de 8h a 20h y Sábados no festivos de 8h a 14h
 - Franja Reducida: Resto del tiempo
- Estructura 5:
 - Franja Normal: Lunes a Viernes no festivos de 8h a 21h y Sábados no festivos de 8h a 14h
 - Franja Reducida: Resto del tiempo
- Estructura 6:
 - Franja Normal: Lunes a Viernes no festivos de 8h a 22h y Sábados no festivos de 8h a 14h
 - Franja Reducida: Resto del tiempo

Las pruebas iniciales del algoritmo evolutivo se realizaron sobre el tráfico generado para UC3MOVIL en el periodo bajo estudio. En primer lugar se

consideró el esquema con establecimiento de llamada y después el de periodo de franquicia. Al aplicar el algoritmo sobre el esquema con establecimiento de llamada, se pudo comprobar que los ingresos obtenidos por la solución óptima de cualquier estructura no mejoraba si quiera los que se obtendrían aplicando como tarifa el precio medio máximo de la CMT, $PM_{MAX} = 0,0803\text{€/minuto}$. Esto es debido a que la relación entre el tráfico de la franja normal y de la franja reducida no varía notablemente entre el periodo bajo estudio (del 16 de octubre de 2008 al 15 de abril de 2009) y el periodo de validación del PM_{MAX} (del 1 mayo de 2007 al 30 abril de 2008). En cualquier caso, este resultado no resta validez al método, ya que si la evolución de la relación de tráfico entre franjas se hubiese incorporado durante el modelado del tráfico de UC3MOVIL, los resultados del esquema con establecimiento habrían mejorado.

Por su parte, cuando se aplicó el algoritmo sobre el esquema con periodo de franquicia, se consiguió una mejora apreciable sobre el precio medio máximo, siendo muy similar para todas las estructuras analizadas. De hecho, la mejora fue de un 2,90% para todas ellas. Esta similitud se da porque la solución óptima es muy próxima a la franja única, lo cual queda de manifiesto en la siguiente tabla, que representa los ingresos calculados sobre el tráfico de UC3MOVIL en función de las tarifas óptimas de cada estructura.

	Esquema con periodo de franquicia		
	Ingresos	Tarifa óptima en franja normal (€/min)	Tarifa óptima en franja reducida (€/min)
Estructura 1	15.678.758	0,074099	0,074099
Estructura 2	15.678.787	0,074100	0,074098
Estructura 3	15.678.803	0,074100	0,074098
Estructura 4	15.678.777	0,074100	0,074098
Estructura 5	15.678.794	0,074100	0,074098
Estructura 6	15.678.809	0,074100	0,074098

Tabla 5.11 Variación de los ingresos de terminación en función de la estructura de tarificación (tráfico de UC3MOVIL)

Como vemos, todas las estructuras salvo la primera maximizan los ingresos para las mismas tarifas nominales, con mínimas diferencias de ingresos entre todas ellas. Globalmente, los máximos ingresos de terminación se consiguen para la sexta estructura, que es la que más porcentaje de tráfico considera incluido en la franja normal. Estos ingresos son de 15.678.809€, que

se corresponden con un ingreso medio de 0,082698€/min. Esto supone un incremento de 454.580€ por encima de los ingresos que se habrían obtenido usando el precio medio máximo de la CMT como tarifa (15.224.229€, para 0,080300€/min), lo cual se corresponde con la mejora del 2,90% que ya hemos indicado.

Para ilustrar el modo en que el algoritmo evolutivo encuentra las tarifas óptimas utilizamos la siguiente figura, que muestra la evolución de las 1000 primeras iteraciones de una ejecución del algoritmo. Se representan los ingresos conseguidos por el mejor individuo de la población al ser aplicado como tarifa sobre el tráfico de UC3MOVIL en el periodo bajo estudio.

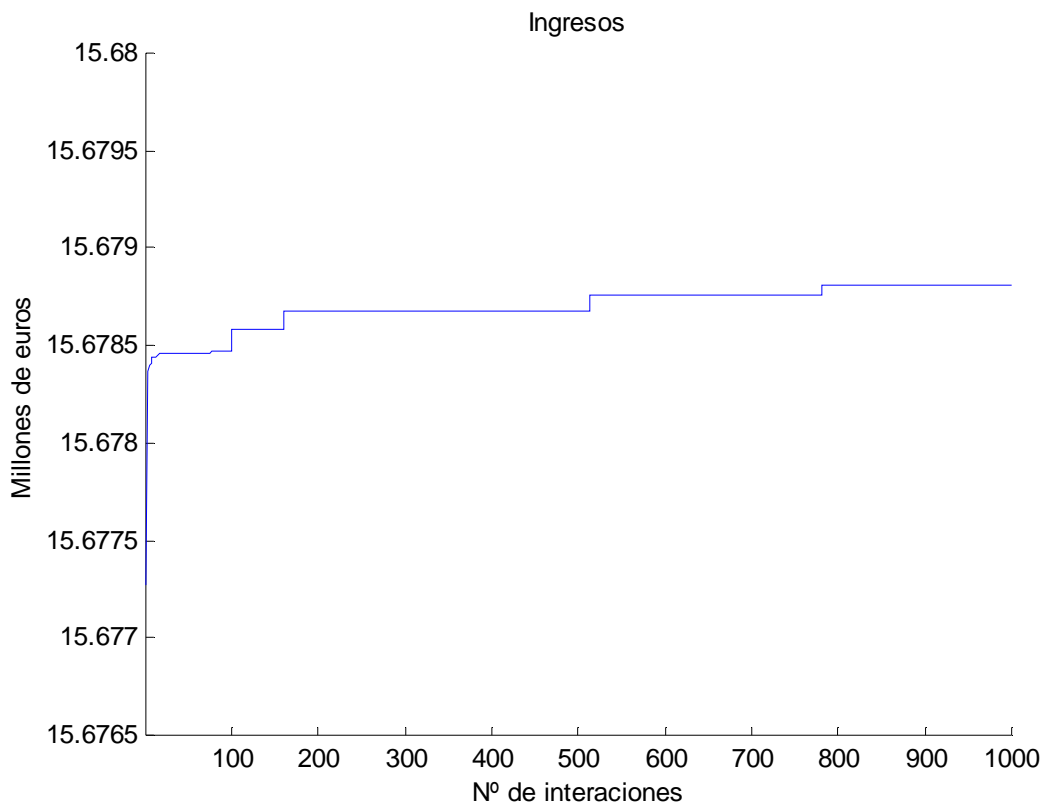


Figura 5.19 Evolución de los ingresos del mejor individuo de la población

En esta figura se observa cómo el algoritmo puede devolver una solución muy próxima a la óptima tras un reducido número de iteraciones. Sin embargo, también se observa cómo para alcanzar la mejor solución, el número de iteraciones necesarias es elevado. En este punto cabe recordar que el

algoritmo se ha diseñado para que se ejecute durante 10.000 iteraciones, de modo que se garantice alcanzar la mejor solución. Sin embargo, este objetivo se puede conseguir reduciendo el número de iteraciones, siempre que se tomen acciones adicionales. Una alternativa que nos proporcionó buenos resultados fue utilizar un algoritmo de gradiente a partir de la solución obtenida por el algoritmo evolutivo tras un número de iteraciones suficiente (500 fueron bastantes en nuestro caso). Esta forma de proceder nos asegura que el algoritmo de gradiente nos devuelva la solución óptima.

La mejora conseguida en los ingresos de terminación al emplear el esquema con periodo de franquicia viene dada por cómo se evalúa la restricción del PM_{MAX} de la CMT, realizada a través del método de los ponderadores de tráfico que vimos en el capítulo 3. Este método no tiene en cuenta el aporte real al precio medio de las llamadas de duración menor o igual al periodo de franquicia (un minuto), sino una aproximación dada por la tarifa típica. De esta forma, cuando el número de llamadas de duración menor o igual a un minuto es suficientemente elevado, el modelado de la tarifa típica no es capaz de reproducir el perfil de tráfico de este tipo de llamadas, dejando la posibilidad de incrementar las tarifas respetando el PM_{MAX} , y habilitando así una mejora en los ingresos respecto de los que se obtendrían sin aplicar la franquicia. También podría darse el caso en que la corrección de la tarifa típica fuese demasiado restrictiva para el volumen real de llamadas de duración menor o igual a un minuto, en cuyo caso la tarifa óptima sería el propio PM_{MAX} de la CMT.

Con las pruebas anteriores hemos evaluado el funcionamiento del algoritmo sobre el tráfico generado para UC3MOVIL. Sin embargo, para comprobar el buen funcionamiento del procedimiento de optimización, es necesario obtener las tarifas óptimas para el tráfico predicho a través del proceso gaussiano del aparatado anterior. Este es el escenario que realmente se presentaría a un operador móvil a la hora de determinar sus tarifas nominales. Por ello, aplicamos el algoritmo sobre este tráfico sobre los 6 esquemas. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

	Esquema con periodo de franquicia		
	Ingresos	Tarifa óptima en franja normal (€/min)	Tarifa óptima en franja reducida (€/min)
Estructura 1	15.564.362	0,074099	0,074099
Estructura 2	15.564.388	0,074100	0,074098
Estructura 3	15.564.404	0,074100	0,074098
Estructura 4	15.564.379	0,074100	0,074098
Estructura 5	15.564.395	0,074100	0,074098
Estructura 6	15.564.411	0,074100	0,074098

Tabla 5.12 Variación de los ingresos de terminación en función de la estructura de tarificación (tráfico predicho por proceso gaussiano)

Los resultados son formalmente idénticos a los obtenidos con el tráfico de UC3MOVIL, con la diferencia de que los ingresos para el tráfico predicho son ligeramente inferiores. La disminución de ingresos está debida principalmente a que el tráfico predicho resultó levemente inferior al tráfico de UC3MOVIL. Sin embargo, esto no es un problema, ya que el porcentaje de tráfico en cada uno de los horarios se ha reflejado perfectamente en la predicción, lo cual es lo más determinante. Este hecho viene a confirmar lo que ya demostramos en el capítulo 3, donde concluíamos que el incremento de ingresos es mucho más sensible al buen funcionamiento del procedimiento que a la variación del volumen del tráfico previsto.

Sin embargo, lo más importante es que el algoritmo proporciona el mismo esquema de tarificación e incluso las mismas tarifas tanto para el tráfico de UC3MOVIL como para su predicción. Dado que tanto las tarifas como el esquema son los óptimos se confirma que el procedimiento completo, entendido como la predicción del tráfico seguida de la optimización de tarifas, conduce a la maximización de los ingresos por tráfico de terminación de voz.

5.3.3. Valoración de resultados

Una vez confirmado el buen funcionamiento del procedimiento de maximización de ingresos de terminación de voz, podemos valorar los resultados obtenidos en el contexto de negocio del operador UC3MOVIL. Como ya hemos indicado, la aplicación del procedimiento conduciría a un aumento de

los ingresos de 454.580€ en los seis meses de duración del periodo bajo estudio. Considerando la posible variación de ingresos globales del operador planteados en el caso de negocio descrito en el capítulo 3, vemos que el peso de los ingresos de terminación varía entre un 13,3% y un 11,2% para las tarifas óptimas. Además, por el hecho de emplear las tarifas óptimas se consigue una mejora directa de entre el 0,28% y 0,33% en los ingresos globales. Este resultado es excelente, y muestra cómo el empleo del procedimiento que hemos diseñado tiene un efecto directo y notable sobre las cuentas del operador móvil. Lo mostramos en la siguiente figura.

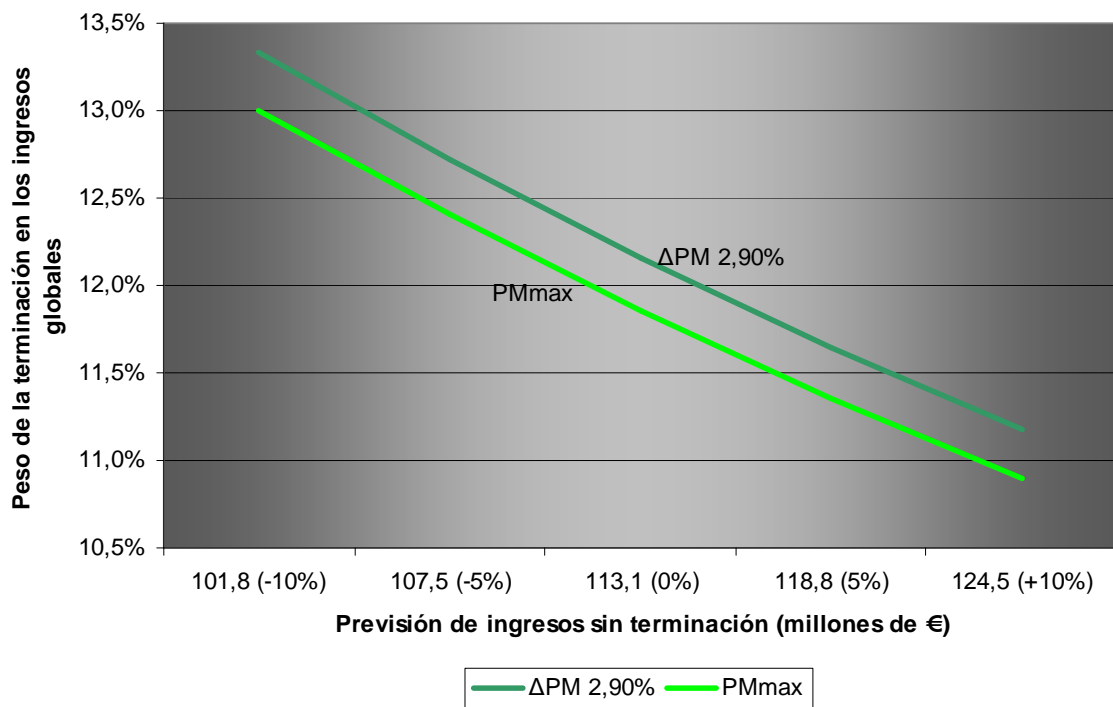


Figura 5.20 Peso de la terminación en los ingresos globales de UC3MOVIL

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y NUEVAS LÍNEAS DE TRABAJO

Una vez completada la exposición de todas las acciones llevadas a cabo en el proyecto, estamos en disposición de extraer las conclusiones más importantes derivadas de su desarrollo. Comenzamos con las conclusiones particulares sobre los resultados obtenidos:

- El empleo de un procedimiento como el diseñado conduce a la maximización de los ingresos de un operador móvil por el tráfico de terminación de voz recibido.
- Una mala selección del esquema de tarificación o de las tarifas nominales de terminación provocaría un impacto negativo directo sobre las cuentas globales del operador, debido al gran peso de este servicio en el total de sus ingresos. Esta circunstancia hace imprescindible la aplicación de un procedimiento fiable, como el que se ha diseñado.

También es relevante aportar algunas conclusiones generales sobre el tipo de trabajo realizado:

- El empleo de técnicas de procesado digital de la información tienen multitud de aplicaciones dentro del sector de las telecomunicaciones, y no sólo las aplicaciones técnicas, sin también aplicaciones de negocio como la que se ha desarrollado.
- Para poder diseñar, implementar o dirigir cualquier proyecto técnico dentro de un entorno de negocio es necesario tener un conocimiento extenso del negocio en cuestión. En nuestro caso, es imprescindible entender el mercado mayorista de comunicaciones móviles y su regulación.

El desarrollo del proyecto se ha centrado en el proceso de maximización de ingresos por tráfico de terminación de voz que recibe por un operador móvil. Sin embargo, tanto el análisis de negocio realizado como las técnicas empleadas abren un amplio espectro de posibles aplicaciones. A continuación indicamos algunas de ellas:

- Dado que los perfiles de tráfico saliente y entrante son muy similares, la herramienta diseñada se puede utilizar de forma directa para la predicción de tráfico de terminación saliente. Su aplicación facilitaría la provisión de los costes asociados en el presupuesto del operador, facilitando así las tareas de control de gestión. Además, una correcta previsión de los costes puede ser de gran utilidad por los departamentos de marketing de un operador, ya que los costes derivados de la terminación de voz en redes de otros operadores supone limitación muy importante para la especificación de tarifas a cliente final.
- En la negociación de acuerdos entre operadores para la provisión de determinados servicios es imprescindible tener una previsión fiable del tráfico asociado. Ejemplos de esto son los servicios de tránsito, el tráfico internacional, la itinerancia internacional (Roaming) o la interconexión de SMS internacionales (SMS Interworking). En todos estos casos, con las oportunas adaptaciones, podrían emplearse las técnicas de predicción desarrolladas.

- Posibles cambios en la regulación de otros servicios de interconexión, como el de acceso o los servicios de inteligencia de red, podrían dar cabida a nuevas aplicaciones para los procedimientos de predicción y optimización diseñados.
- Por último, cabe indicar que las técnicas de predicción implementadas, en especial el perceptrón multicapa y el proceso gaussiano, son susceptibles de ser empleadas para predecir cualquier flujo de tráfico que esté sujeto a condicionantes demográficos, sociales, económicos y comerciales.

CAPÍTULO 7

REFERENCIAS

7.1. DOCUMENTOS OFICIALES Y RECOMENDACIONES

- [1] Boletín Oficial del Estado, BOE 20 de marzo de 2002, páginas 11328 a 11330. ORDEN CTE/601/2002, Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- [2] Acuerdo del Consejo de la CMT de 27 de julio de 2000. Relación de los operadores que, a los efectos de lo previsto en la ley general de telecomunicaciones, tienen la consideración de dominantes en los mercados nacionales de servicios de telefonía fija, servicios de alquiler de circuitos, servicios de telefonía móvil y servicios de interconexión.
- [3] Resolución del Consejo de la CMT de 4 de octubre de 2001. Expediente MTZ 2001/4975.
- [4] Resolución del Consejo de la CMT de 11 de septiembre de 2003. OM 2003/465.

- [5] Resoluciones del Consejo de la Comisión del Mercado de las Telecomunicaciones (CMT) de 28 de septiembre de 2006. Expedientes AEM 2006/724, AEM 2006/725 y AEM 2006/726.
- [6] Resolución del Consejo de la CMT de 4 de octubre de 2007. Expediente AEM 2007/103.
- [7] Diario Oficial de la Unión Europea de 20 de mayo de 2009 (ES). Recomendación de la Comisión Europea de 7 de mayo de 2009 sobre el tratamiento normativo de las tarifas de terminación de la telefonía fija y móvil en la UE (2009/396/CE). Desde página L124/67 a página L124/74.
- [8] Resolución del Consejo de la CMT de 30 de julio de 2009. Expediente AEM 2009/967.
- [9] Resolución del Consejo de la CMT de 2 de abril de 2009. Expediente AEM 2009/481.
- [10] Diario Oficial de la Unión Europea de 29 de junio de 2007 (ES). Reglamento CE 717/2007 de 27 de junio de 2007. Desde página L171/32 a página L171/40.
- [11] Documento de referencia de la CMT. Oferta de Servicios de Interconexión de Referencia de Telefónica de España S.A.U. para Operadores de Redes Públicas de Comunicaciones Electrónicas, OIR. Septiembre de 2006.
- [12] Documento de referencia CMT. Oferta de Referencia de Líneas Alquiladas Terminales, ORLA. Diciembre de 2007.
- [13] Documento de referencia CMT. Oferta de Acceso al Bucle de Abonado, OBA. Diciembre de 2008.
- [14] Publicaciones periódicas de la CMT. Informes anuales desde 2000 a 2008.
- [15] Publicaciones periódicas de la CMT. Estadísticas del Sector. Informes trimestrales de 2004 a 2009 (sólo 1^{er} y 2^o trimestres de 2009).
- [16] ITU – T. Recommendation E.490. Traffic Measurement and Evaluation – General Survey.

- [17] ITU – T. Recommendation E.523. Standard Traffic Profiles for International Traffic Streams.
- [18] Boletín Oficial del Estado, BOE 25 de abril de 1998, páginas 13909 a 13940. Ley 11/1998, General de Telecomunicaciones.
- [19] Boletín Oficial del Estado, BOE 4 de noviembre de 2003, páginas 38890 a 38924. Ley 32/2003, General de Telecomunicaciones.
- [20] Acuerdo del Consejo de la CMT de 27 de julio de 2000. Relación de los operadores que, a los efectos de lo previsto en la ley general de telecomunicaciones, tienen la consideración de dominantes en los mercados nacionales de servicios de telefonía fija, servicios de alquiler de circuitos, servicios de telefonía móvil y servicios de interconexión.
- [21] Resolución del Consejo de la CMT de 4 de octubre de 2001. Relación de los operadores que, a los efectos de lo previsto en la ley general de telecomunicaciones, tienen la consideración de dominantes en los mercados nacionales de servicios de telefonía fija, servicios de alquiler de circuitos, servicios de telefonía móvil y servicios de interconexión. Expediente OM 2003/465.
- [22] Resolución del Consejo de la CMT de 11 de septiembre de 2003. Relación de los operadores que, a los efectos de lo previsto en la ley general de telecomunicaciones, tienen la consideración de dominantes en los mercados nacionales de servicios de telefonía fija, servicios de alquiler de circuitos, servicios de telefonía móvil y servicios de interconexión. Expediente MTZ 2001/4975.
- [23] Acuerdo del Consejo de la CMT de 20 de diciembre de 2001. Propuesta de sistema de contabilidad de costes de TELEFÓNICA MOVILES, S.A. para el ejercicio 2000. Expediente 2001/3989.
- [24] Acuerdo del Consejo de la CMT de 16 de mayo de 2002. Propuesta de sistema de contabilidad de costes de AIRTEL MÓVIL, S.A. Expediente 2001/3989.

- [25] Resolución del Consejo de la CMT de 14 de diciembre de 2004. Propuesta de sistema de contabilidad de costes de RETEVISIÓN MÓVIL, S.A. Expediente MTZ 2004/1082.
- [26] Boletín Oficial del Estado, BOE 9 de junio de 1998, páginas 18968 a 18968. Orden de 18 de mayo de 1998 sobre criterios de interpretación del régimen de tarifas máximas aplicable al tráfico telefónico de fijo a móvil, o al referido a otro operador.
- [27] Resolución del Consejo de la CMT de 29 de marzo de 2007. Expediente AEM 2007/311.
- [28] Resoluciones del Consejo de la CMT de 5 de octubre de 2006. Expedientes AEM 2006/1186 y AEM 2006/1188.
- [29] Resoluciones del Consejo de la CMT de 2 de octubre de 2003. Expedientes MTZ 2003/1356, MTZ 2003/1357 y MTZ 2003/1386.
- [30] Resoluciones del Consejo de la CMT de 11 de julio de 2002. Expedientes MTZ 2000/2393, MTZ 2000/3232.
- [31] Resoluciones del Consejo de la CMT de 18 de diciembre de 2003. Expedientes MTZ 2003/1356, MTZ 2003/1357 y MTZ 2003/1386.
- [32] Resoluciones del Consejo de la CMT de 7 de octubre de 2004. Expedientes MTZ 2004/1301, MTZ 2004/1302 y MTZ 2004/1303.
- [33] Resoluciones del Consejo de la CMT de 29 de septiembre de 2005. Expedientes MTZ 2005/741, MTZ 2005/742 y MTZ 2005/743.
- [34] Boletín Oficial del Estado, BOE 22 de octubre de 2004, páginas 35037 a 35038. Resolución de 6 de octubre de 2004, de la Dirección General de Trabajo, por la que se dispone la inscripción en el registro y publicación de la relación de Fiestas Laborales para el año 2005.
- [35] Boletín Oficial del Estado, BOE 19 de octubre de 2005, páginas 34143 a 34145. Resolución de 11 de octubre de 2005, de la Dirección General de Trabajo, por la que se publica el calendario laboral para el año 2006.
- [36] Boletín Oficial del Estado, BOE 8 de noviembre de 2006, páginas 38840 a 38842. Resolución de 2 de noviembre de 2006, de la

Dirección General de Trabajo, por la que se publica la relación de fiestas laborales para el año 2007.

- [37] Boletín Oficial del Estado, BOE 20 de octubre de 2007, páginas 42708 a 42709. Resolución de 9 de octubre de 2007, de la Dirección General de Trabajo, por la que se publica la relación de fiestas laborales para el año 2008.
- [38] Boletín Oficial del Estado, BOE 15 de noviembre de 2008, páginas 45391 a 45392. Resolución de 5 de noviembre de 2008, de la Dirección General de Trabajo, por la que se publica la relación de fiestas laborales para el año 2009.
- [39] Página Web del Instituto Nacional de Estadística. Cifras de población y censos demográficos: <http://www.ine.es/inebmenu/indice.htm>

7.2. PUBLICACIONES Y BIBLIOGRAFÍA

- [Hee07] Heegaard, P. E. Empirical Observations of Traffic Patterns in Mobile and IP Telephony. Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking. NEW2AN 2007.
- [Ive05] Iversen, V. B. Handbook in Teletraffic Engineering. ITC / ITU-D 2005.
- [Hay95] Haykin, Simon. Adaptive Filter Theory. Prentice Hall, 1995.
- [Dud+01] Duda, Richard O. & Hart, Peter E. Pattern Classification and Scene Analysis, 2nd Ed. John Wiley & Sons, 2001.
- [Bon+99] Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz. Swarm Intelligence. From Nature to Artificial Systems. Oxford University Press, 1999.
- [The92] Therrien, Charles W. Discrete Random Signals and Statistical Signal Processing. Prentice Hall, 1992.
- [Hay99] Haykin, Simon. Neural Networks. A Comprehensive Foundation (2^a edición). Prentice-Hall, 1999.
- [Ras+06] Rasmussen, C. E., Williams, K. I. Gaussian Processes for Machine Learning. The MIT Press, 2006.

- [Ebd08] Ebdén, M. Gaussian Processes for Regression: A Quick Introduction. 2008.
- [Mac06] MacKey, David. Gaussian Process Basics. University of Cambridge, 2006.

ANEXO A

PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO

En el siguiente diagrama de Gantt se muestra la planificación del proyecto. Contiene la información detallada sobre la duración de todas las tareas realizadas para la consecución del proyecto. Las fases principales se corresponden con las indicadas en la introducción del presente documento. Su duración se expresa en días de trabajo (cada día incluye 8 horas laborables). También se incluye el desglose de estas fases por las tareas individuales que las componen. La duración de cada tarea individual se expresa en horas.

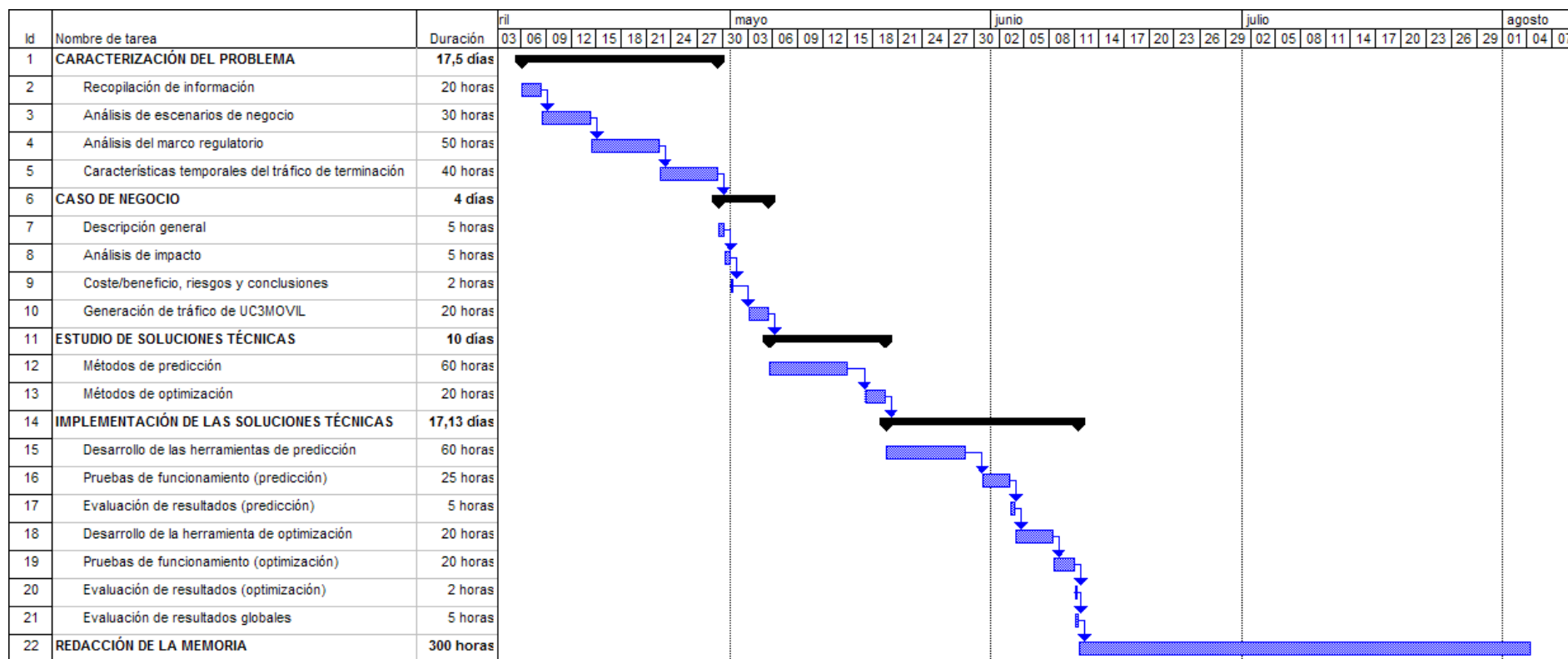


Figura A.1 Planificación del proyecto

ANEXO B

PRESUPUESTO DEL PROYECTO

A continuación se detalla el presupuesto del proyecto. Se incluyen los costes de personal, costes de equipos, subcontratación de tareas y otros costes directos del proyecto. Se concluye con un resumen de los costes totales del proyecto.



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Escuela Politécnica Superior

PRESUPUESTO DE PROYECTO

1.- Autor:

Sergio Hurtado Camarasa

2.- Departamento:

Teoría de la Señal y Comunicaciones

3.- Descripción del Proyecto:

Título **Estimación de Precios Nominales de Interconexión para la CMT**
 Duración (meses) **4 meses**
 Tasa de costes indirectos: **18%**

4.- Presupuesto total del Proyecto (valores en Euros):

33.095,07 Euros

5.- Desglose presupuestario (costes directos)

PERSONAL

Apellidos y nombre	N.I.F.	Categoría	Dedicación (hombres mes) ^{a)}	Coste hombre mes	Coste (Euro)
Sergio Hurtado Camarasa		Ingeniero Senior	4	7.000,00	28.000,00
		Ingeniero	0	0,00	0,00
Hombres mes 4				Total	28.000,00

^{a)} 1 Hombre mes = 176 horas (22 días laborables/mes y 8 horas laborables/día)

EQUIPOS

Descripción	Coste (Euro)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable ^{d)}
Ordenador personal	700,00	100	4	60	46,67
Total					46,67

^{d)} Fórmula de cálculo de la Amortización:

$$\frac{A}{B} \times C \times D$$

A = nº de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado

B = periodo de depreciación (60 meses)

C = coste del equipo (sin IVA)

D = % del uso que se dedica al proyecto (habitualmente 100%)

SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS

Descripción	Empresa	Coste imputable
Total		0,00

OTROS COSTES DIRECTOS DEL PROYECTO^{e)}

Descripción	Empresa	Costes imputable
Total		0,00

^{e)} Este capítulo de gastos incluye todos los gastos no contemplados en los conceptos anteriores, por ejemplo: fungible, viajes y dietas, otros,...

6.- Resumen de costes

Presupuesto Costes Totales	Presupuesto Costes Totales
Personal	28.000,00
Amortización	46,67
Subcontratación de tareas	0,00
Costes de funcionamiento	0,00
Costes Indirectos	5.048,40
Total	33.095,07

El presupuesto total de este proyecto asciende a la cantidad de 33.095,07 EUROS.

Leganés, Septiembre de 2010.

El ingeniero proyectista.

Sergio Hurtado Camarasa